

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

HERYKE DOS SANTOS MIGUEL

INFLUÊNCIA DA MANTA NAS LIGAÇÕES INTERLAMINARES ENTRE TECIDOS EM  
PRFV

Joinville

2019

HERYKE DOS SANTOS MIGUEL

INFLUÊNCIA DA MANTA NAS LIGAÇÕES INTERLAMINARES ENTRE TECIDOS EM  
PRFV

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Joinville

2019

HERYKE DOS SANTOS MIGUEL

INFLUÊNCIA DA MANTA EM LIGAÇÕES INTERLAMINARES ENTRE TECIDOS EM  
PRFV

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de novembro de 2019.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Orientador  
Presidente

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha mãe Zilda dos Santos Miguel, ao meu pai Ernandes Tavares Miguel e a minha tia Walma Tavares Miguel.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Senhor Deus por ter me dado serenidade para enfrentar os momentos difíceis durante a graduação, sabedoria para lidar com as adversidades e saúde para concluir mais uma etapa da minha vida.

Agradeço ao meu pai Ernandes, à minha mãe Zilda e à minha tia Walma por terem me dado todo o suporte necessário para concluir o curso de Engenharia Naval. Sempre me incentivando a estudar e evoluir como um ser humano.

Agradeço ao professor Ricardo por ter me orientado de forma atenciosa, compreensiva e dedicada. Também agradeço aos membros da banca Thiago e Luis por terem contribuído para a melhoria do trabalho.

Agradeço ao professor Masahiro Tomiyama por ter disponibilizado o laboratório de ensaios mecânicas da Universidade Estadual de Santa Catarina para realizar os ensaios deste trabalho. Também agradeço ao estagiário Eduardo, a dedicação e atenção em acompanhar os ensaios.

Por fim, agradeço aos amigos Geller, Neixos, Dief, Chape, Russo, Navega e Ed pelos momentos descontraídos e divertidos que tivemos durante a graduação.

Sofra a dor da disciplina ou sofra a dor do arrependimento (Autor Desconhecido).

## RESUMO

Os profissionais responsáveis pelo desenvolvimento do produto, projeto, análise estrutural e processo de fabricação devem conhecer o potencial dos materiais a serem selecionados, extraindo todas as qualidades e conhecendo suas limitações. Essa compreensão permite selecionar corretamente os materiais para uma aplicação. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência da manta nas ligações interlaminares entre tecidos em PRFV. Para isso foram confeccionados corpos de prova com união por sobreposição simples, sendo que dez deles feitos com união de manta e dez sem a presença de manta na união. Estes corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração conforme a norma ASTM afim de se obter a resistência ao cisalhamento da união. Entre os processos comuns de fabricação de compósito utilizados na indústria náutica, optou-se por confeccionar os corpos de prova através do método de laminação manual, pois se trata de um processo com baixo custo de ferramental, fácil assimilação das etapas e produz laminados com boas propriedades mecânicas. A resina poliéster insaturada foi utilizada como matriz. Os resultados obtidos nos ensaios foram condizentes com as bibliografias pesquisadas, que sugerem a intercalação de manta entre as camadas de tecido laminadas, afim de evitar falhas por cisalhamento interlaminar, causando uma delaminação no compósito. As comparações dos resultados obtidos nos ensaios mostraram que a resistência ao cisalhamento da união com manta foi maior que a união somente com tecido, ou seja, a manta teve influência positiva para o aumento da resistência ao cisalhamento interlaminar.

**Palavras-chave:** Compósito. Cisalhamento. Interlaminar. Delaminação. Tração.

## ABSTRACT

The professionals responsible for product development, design, structural analysis and manufacturing process should know the potential of the materials to be selected, extracting all the qualities and knowing their limitations. This understanding allows the correct selection of materials for an application. In this context, the objective of this work was to study the influence of the mat on interlaminar bonds between fabric in FRP. For this purpose, specimens were made with simple overlap joints, ten of them made with mat joints and ten without the presence of mat in the joint. These specimens were submitted to tensile test according to the ASTM standard in order to obtain the shear strength of the joint. Among the common composite manufacturing processes used in the nautical industry, it was opted to manufacture the specimens through the method of hand lay-up, because it is a process with low tooling cost, easy assimilation of the steps and produces laminates with good mechanical properties. The unsaturated polyester resin was used as a matrix. The results obtained in the tests were consistent with the bibliographies researched, which suggest the intercalation of the mat between the layers of laminated fabric, in order to avoid failures by interlaminar shear, causing a delamination in the composite. Comparisons of the results obtained in the tests showed that the shear strength of the joint with mat was higher than the joint with fabric only, i.e., the mat had a positive influence on the increase of the interlaminar shear strength.

**Keywords:** Composite. Shear. Interlaminar. Delamination. Tensile.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação dos três principais grupos de materiais compósitos.....	17
Figura 2 – Representação de uma lâmina com fibra contínua unidirecional.....	18
Figura 3 – Propriedades das fibras e dos materiais em sua forma maciça .....	18
Figura 4 – Ilustração do processo de fabricação da fibra de vidro .....	19
Figura 5 – Processo de fabricação de mantas .....	21
Figura 6 – Tecido biaxial de fibra de vidro +45/-45 com 400g/m <sup>2</sup> .....	23
Figura 7 – Propriedades mecânicas das resinas.....	24
Figura 8 – Poliéster Insaturado .....	25
Figura 9 – Durômetro Barcol.....	26
Figura 10 - Processo de laminação manual .....	30
Figura 11 – Tipos de falha nos compósitos poliméricos .....	32
Figura 12 – Modos de falha nos compósitos poliméricos .....	34
Figura 13 – Sequência de fratura frágil .....	35
Figura 14 – Representação de dois casos possíveis de ductibilidade relativa dos constituintes e suas repercussões na resistência de compósito.....	35
Figura 15 – Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas, exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento .....	36
Figura 16 – Representação esquemática da deformação de união de sobreposição simples ...	37
Figura 17 – Metodologia geral .....	38
Figura 18 – Disposição das camadas dos CPs com união de manta .....	39
Figura 19 – Disposição das camadas dos CPs com união sem manta.....	40
Figura 20 – Disposição das camadas dos CP contínuo com manta.....	41
Figura 21 - Disposição das camadas dos CPs contínuos sem manta.....	41
Figura 22 – Pesagem do tecido biaxial +45/-45 e manta.....	43
Figura 23 – Pesagem da resina .....	44
Figura 24 – Laminação de tecido biax45 e CSM .....	45
Figura 25 – Lixamento da superfície do laminado tecido + manta .....	45
Figura 26 – Perfil tecido-manta-tecido-manta.....	46
Figura 27 – Lixamento entre camadas de tecido e manta.....	47
Figura 28 – Perfil final da laminação com união de manta .....	47
Figura 29 – Pesagem do perfil tecido-manta-tecido.....	48

Figura 30 – Perfil tecido-manta-tecido.....	48
Figura 31 – Primeira etapa da laminação do perfil e preparação para a segunda etapa .....	49
Figura 32 - Perfil final da laminação com união de tecido.....	49
Figura 33 – Dimensões dos corpos de prova.....	52
Figura 34 – Canaleta utilizada como guia para os recortes dos CP's.....	53
Figura 35 – Corpos de prova com união de manta.....	53
Figura 36 – Corpos de prova com união sem manta .....	54
Figura 37 – Ajuste de configurações para todos os ensaios de tração.....	55
Figura 38 – Ajuste da posição dos corpos de prova nas garras .....	55
Figura 39 – Temperatura e humidade relativa do ar para os cps com união de manta.....	56
Figura 40 – Perfil do corpo de prova com união de manta.....	57
Figura 41 – Perfil do corpo de prova com união sem manta.....	57
Figura 42 – Perfil do corpo de prova contínuo com manta .....	58
Figura 43 – Perfil do corpo de prova contínuo sem manta.....	59
Figura 44 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com união de manta.....	61
Figura 45 – Primeira característica de falha dos CP's com união de manta .....	62
Figura 46 – Segunda característica de falha dos CP's com união de manta .....	62
Figura 47 – Terceira característica de falha dos CP's com união de manta .....	63
Figura 48 – Quarta característica de falha dos CP's com união de manta .....	63
Figura 49 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com união sem manta.....	64
Figura 50 – Corpo de prova com máxima resistência ao cisalhamento .....	66
Figura 51 – Corpo de prova com mínima resistência ao cisalhamento .....	66
Figura 52 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de contínuos com manta.....	67
Figura 53 – Resultados dos CPs ensaiados contínuos com manta .....	68
Figura 54 - Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova contínuos sem manta.....	70
Figura 55 – Resultados dos cps ensaiados contínuos sem manta .....	71
Figura 56 – Ponto de possível concentração de tensão da sobreposição na superfície em contato com o molde .....	79
Figura 57 – Exemplo de eliminação da possível concentração de tensão .....	79
Figura 58 – Ponto de possível concentração de tensão para CPs com união sem manta .....	81
Figura 59 – Perfil do laminado com união sem manta com uma possível concentração de tensão .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propriedades das fibras de vidro .....	20
Tabela 2 – Requisitos dimensionais corpo de prova e tabs .....	50
Tabela 3 – Geometria recomendada para os corpos de prova .....	51
Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração dos CP's com união de manta .....	60
Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração dos CP's com união sem manta.....	65
Tabela 6 – Resultado do ensaio de tração dos CPs contínuos com manta .....	68
Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração dos CPs contínuos sem manta.....	69
Tabela 8 – Comparação entre CPs com União de Manta e União sem Manta.....	75
Tabela 9 - Comparação entre CPs com União de Manta e Contínuos com Manta .....	76
Tabela 10 - Comparação entre CPs com União sem Manta com Contínuos sem Manta .....	77
Tabela 11 - Comparação entre CPs Contínuos com Manta e Contínuos sem Manta.....	78

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASTM – American Society for Testing and Materials

BIAX45 – Tecido de Fibra de Vidro Bi-axial +45/-45

CSM – Chopped Strand Mat

CP – Corpo de Prova

WR – Woving Roving

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2. COMPÓSITOS FIBRADOS</b> .....	<b>17</b>
2.1. FIBRAS DE REFORÇO .....	19
<b>2.1.1. Tipos de Reforço</b> .....	<b>20</b>
<u>2.1.1.1. Mantas</u> .....	<u>21</u>
<u>2.1.1.2. Tecido</u> .....	<u>22</u>
2.2. RESINAS .....	23
<b>2.2.1. Resina Poliéster Insaturado</b> .....	<b>24</b>
2.3. MECANISMOS DE CURA .....	25
<b>2.3.1. Grau de Cura</b> .....	<b>26</b>
<b>3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO</b> .....	<b>28</b>
3.1. LAMINAÇÃO MANUAL (HAND LAY-UP) .....	28
<b>3.1.1. Processo</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1.2. Equipamentos</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1.3. Vantagens e Desvantagens</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1.4. Aplicações</b> .....	<b>31</b>
<b>4. FALHA E FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS</b> .....	<b>32</b>
4.1. TIPOS DE MODOS DE FALHA .....	32
<b>4.1.1. Falha Intralaminar</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1.2. Falha Interlaminar</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1.3. Falha Translaminar</b> .....	<b>33</b>
4.2. TRAÇÃO LONGITUDINAL .....	34
4.3. UNIÃO POR SOBREPOSIÇÃO .....	37
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
5.1. MATERIAIS .....	38
5.2. CORPOS DE PROVA .....	39
<b>6. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>43</b>
6.1. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM UNIÃO DE MANTA .....	43

6.2. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM UNIÃO SEM MANTA .....	47
6.3. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CONTÍNUO .....	49
6.5. RECORTE DOS CORPOS DE PROVA .....	50
<b>6.5.1. Norma ASTM D3039/D3039M.26738 .....</b>	<b>50</b>
<b>6.5.2. O Recorte.....</b>	<b>51</b>
6.6. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	54
<b>6.6.1. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova com União de Manta .....</b>	<b>56</b>
<b>6.6.2. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova com União sem Manta.....</b>	<b>57</b>
<b>6.6.3. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Contínuos .....</b>	<b>58</b>
<b>7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
7.1. RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO DE MANTA .....	59
7.2. RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO SEM MANTA .....	63
7.3. RESULTADOS DOS CPS CONTÍNUOS COM MANTA .....	66
7.4. RESULTADOS DOS CPS CONTÍNUOS SEM MANTA .....	69
<b>8. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
8.1. TESTES ESTATÍSTICOS .....	72
<b>8.1.1. Teste F para Duas Variâncias .....</b>	<b>72</b>
<b>8.1.2. Teste Não Paramétrico de Mann-Whitney.....</b>	<b>73</b>
<u>8.1.2.1. Comparação entre CPs com União de Manta e União sem Manta.....</u>	<u>74</u>
<u>8.1.2.2. Comparação entre CPs com União de Manta e Contínuos com Manta.....</u>	<u>75</u>
<u>8.1.2.3. Comparação entre CPs com União sem Manta com Contínuos sem Manta .....</u>	<u>76</u>
<u>8.1.2.4. Comparação entre CPs Contínuos com Manta e Contínuos sem Manta .....</u>	<u>77</u>
8.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO DE MANTA .....	78
8.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO SEM MANTA .....	80
8.4. ANÁLISE DOS RESULTOS DOS CPS CONTÍNUOS.....	83
<b>9. CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE A – FIBRAS.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE B – RESINAS .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE C – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE D – TECIDO CONTAMINADO .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA COM UNIÃO DE MANTA .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE F – CORPOS DE PROVA COM UNIÃO SEM MANTA .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE G – EXEMPLO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO .....</b>	<b>109</b>

<b>ANEXO A – MANTA.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO B – RESINA POLIÉSTER ORTOFITÁLICA INSATURADA .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO C – INICIADOR BRASNOX DM50 .....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO D – SOLUÇÃO DE LIMPEZA QUIMSOLV-A .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO E – TECIDO BIAxIAL WOVING ROVING CONTAMINADO.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO F – TECIDO BIAxIAL +45/-45 400G/M<sup>2</sup> .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO G – SERRA CIRCULAR MANUAL .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO H – TABELA DISTRIBUIÇÃO F PARA DUAS VARIÂNCIAS .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO I – TABELA DO TESTE DE MANN-WHITNEY .....</b>	<b>121</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, a evolução do conhecimento esteve intimamente ligada ao aprimoramento e ao desenvolvimento de novos materiais, que permitiriam atingir duas das mais importantes etapas do progresso humano: a navegação marítima e a exploração do espaço (MARINUCCI, 2011). Escolher um tipo de material para construir determinado barco muitas vezes não é uma tarefa fácil devido a variedades de opções existentes, como aço, alumínio, madeira, fibra ou mesmo a combinação de todos eles (NASSEH, 2007). Os engenheiros hoje são colocados a grandes desafios para selecionar corretamente um material e o processo de fabricação para a aplicação (MAZUNDAR, 2002).

Nesse contexto, os materiais compósitos têm tido participação ativa nas últimas quatro décadas, especialmente naquelas envolvendo tecnologia de ponta (MARINUCCI, 2019). Estes materiais têm grande interesse na área de engenharia devido aos baixos valores de massa específica ( $\sim 2\text{g/cm}^3$ ), aliados a elevada resistência mecânica (PARDINI, 1999). No que se refere ao investimento e valor de revenda, barcos construídos em fibra têm, certamente, a menor depreciação ao longo do tempo (NASSEH, 2007).

Apesar das boas propriedades mecânicas existentes nos materiais compósitos, a constante evolução tecnológica impõe otimização de peso e eficiência na fabricação de barcos (NASSEH, 2008). E a qualidade de um produto empregando-se este tipo de material é fortemente influenciada pelo processo de fabricação (MARINUCCI, 2011). Aspectos como frações volumétricas da fibra e matriz, orientação correta do reforço, disposição das camadas de laminação, tempo de cura da matriz e método empregado para a fabricação do composto são uns dos fatores decisivos para se obter um bom resultado final do produto. (ABMACO, 2008).

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da manta nas ligações interlaminares entre tecido em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). Algumas literaturas como Nasseh (2007, p. 29) que diz a respeito que para prevenir a delaminação do compósito ocasionado pelo cisalhamento interlaminar, sugere-se intercalar camadas de manta com um maior teor de resina entre os tecidos. Essa técnica é empregada em diversos processos de fabricação em compósito, mas pouco se sabe ou encontra em literaturas o quanto a utilização de manta entre camadas de tecido influencia nas propriedades mecânicas do laminado.



Para analisar a influência da manta entre laminações de tecido, o estudo consistiu na confecção de dois modelos de corpos de prova com união por sobreposição simples, o primeiro com união de manta intercalada entre tecidos e o segundo sem a presença de manta na união.

Então os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração como método de avaliar o cisalhamento interlaminar da ligação.

### 1.1. OBJETIVOS

Verificar a diferença na resistência do cisalhamento interlaminar de PRFV confeccionadas em tecidos com ou sem intercalação de mantas.

#### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência de mantas de vidro em união de tecidos de vidro biaxiais.

#### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar a metodologia do processo de laminação adequado para o ensaio;
- Estudar processos de união entre camadas de laminações de PRFV;
- Discernir os métodos de falha e fratura de materiais compósitos poliméricos;
- Laminar corpos de prova de PRFV com manta entre união de tecidos;
- Laminar corpos de prova de PRFV sem manta entre união de tecidos;
- Comparar os corpos de prova obtidos das duas configurações de laminado em termos das propriedades mecânicas de resistência à tração.

## 2. COMPÓSITOS FIBRADOS

Um material compósito é produzido combinando dois ou mais materiais para fornecer uma combinação única de propriedades (MAZUNDAR, 2002). Porém, admite-se como material compósito, quando as fases constituintes apresentam nítida diferença nas propriedades físicas e químicas, mostrando uma fase descontínua e uma fase contínua (MARINUCCI, 2011).

Segundo Abmaco (2008), a fase descontínua são os reforços, enquanto a fase contínua é denominada de matriz. E os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa (descontínua) está na forma de uma fibra (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Os compósitos reforçados com fibra são caracterizados por possuírem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso (NASSEH, 2007). Sendo que a sua característica mecânica não depende somente das propriedades das fibras, mas também de como uma carga aplicada é distribuída no material (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). A Figura 1 ilustra os principais grupos de materiais compósitos.

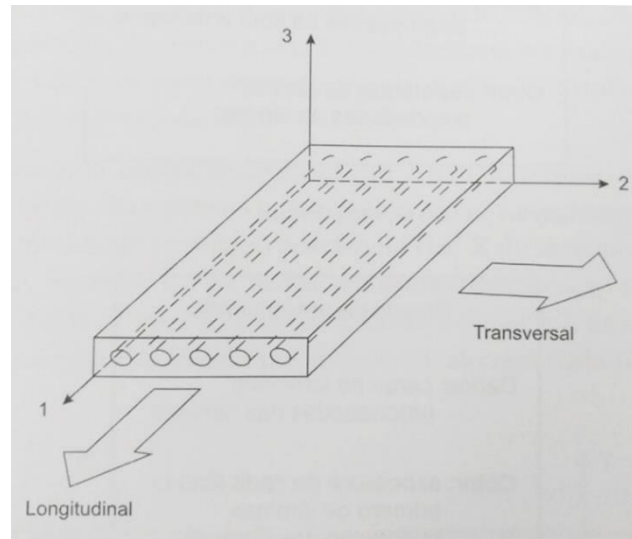
Figura 1 - Esquema de classificação dos três principais grupos de materiais compósitos



Fonte: Callister e Rethwisch (2012, p. 537).

O compósito fibrado, aquele que apresenta o reforço na forma de fibras, pode ser formado por lâminas ou camadas, sendo que essas representam de fato o elemento básico de um material reforçado com fibra (MARINUCCI, 2011). A Figura 2 representa uma lâmina com fibras contínuas unidirecionais.

Figura 2 – Representação de uma lâmina com fibra contínua unidirecional



Fonte: Marinucci (2011, p 25).

Uma das razões principais para utilização de fibras em materiais compósitos, é que as mesmas apresentam propriedades mecânicas muito superiores aos dos materiais idênticos na forma maciça (MAGALHÃES; MORAIS; MOURA, 2010). A Figura 3 representa as propriedades das fibras e de materiais em sua forma maciça.

Figura 3 – Propriedades das fibras e dos materiais em sua forma maciça

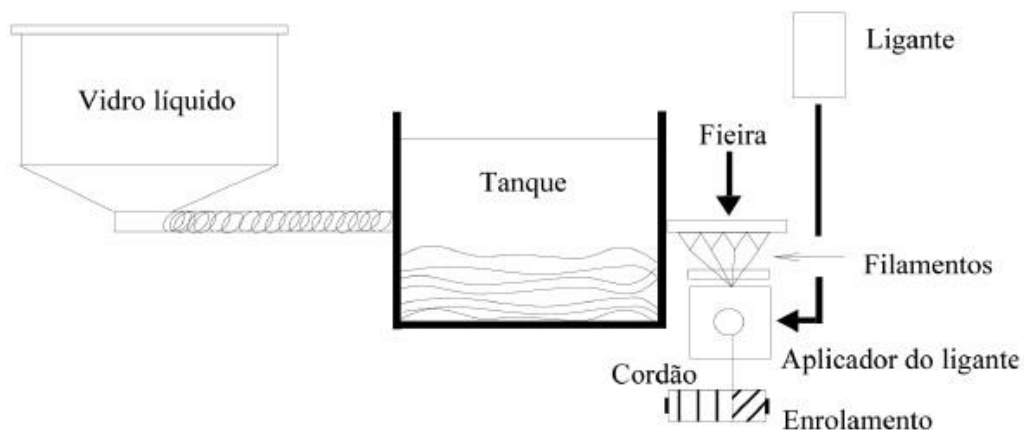
Material	Módulo de elasticidade, $E$ (GPa)	Resistência à tracção, $\sigma_u$ (GPa)	Densidade, $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Módulo específico, $E/\rho$	Resistência específica, $\sigma_u/\rho$
<b>Fibras:</b>					
Vidro E	72	3.5	2.54	28.5	1.38
Vidro S	87	4.3	2.49	35.0	1.70
Carbono (Pitch CP-	690	2.2	2.15	321	1.00
Carbono (PAN C	345	2.3	1.85	186	1.24
Boro	393	3.1	2.70	146	1.15
Sílica	72.4	5.8	2.19	33	2.65
Tungstênio	414	4.2	19.3	21	0.22
Berílio	240	1.3	1.83	131	0.71
Kevlar® 49	131	3.6	1.45	90	2.48
<b>Materiais convencionais:</b>					
Aço	210	0.34 – 2.1	7.8	26.9	0.043 – 0.27
Ligas de Al	70	0.14 – 0.62	2.7	25.9	0.052 – 0.23
Vidro	70	0.7 – 2.1	2.5	28	0.28 – 0.84
Tungstênio	350	1.1 – 4.1	19.3	18.1	0.057 – 0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

Fonte: Magalhães et al. (2010, p. 2).

## 2.1. FIBRAS DE REFORÇO

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida que é resfriado em alta viscosidade e passa por fieira constituída de um número de orifícios tipicamente na faixa de 2000 a 4000 (Figura 4) (ABMACO, 2008). E o diâmetro dos monofilamentos de vidro pode variar em função dos microfuros da fieira, mas estão numa faixa de 12 a 16  $\mu\text{m}$ .

Figura 4 – Ilustração do processo de fabricação da fibra de vidro



Fonte: Magalhães et al. (2010, p. 10).

A aplicação do ligante (blinder ou sizing) tem a função de conferir flexibilidade a fibra de vidro, compatibilidade com a matriz polimérica que será empregada para fabricação do compósito, proteção superficial e também atua como agente de aglutinação dos filamentos (MARINUCCI, 2011).

De todas as variedades de fibras disponíveis para uso, as fibras de vidro do tipo E, C e S são as mais utilizadas, entretanto o maior interesse do construtor de barcos certamente é no vidro tipo E (NASSEH, 2011).

A fibra do tipo E surgiu devido a necessidade de aprimoramento da fibra do tipo A, pois apesar do tipo A oferecer boa resistência química, a mesma tem detrimento das propriedades elétricas, ou seja, não recomendada em aplicações que exigem isolamento elétrico (MARINUCCI, 2011). Além disso, as fibras tipo E apresentam baixo teor de álcalis, o que faz mais resistentes que o vidro tipo A e com boas propriedades dielétricas (ABMACO, 2008). A sua grande popularidade nos materiais compósitos decorre do seu custo baixo aliado às excelentes propriedades mecânicas que proporciona (NASSEH, 2011).

Quando o objetivo é elevada resistência química, a fibra do tipo C deve ser utilizada, pois possui sódio borossilicato, tornando-a recomendada para fabricação de véus de superfície (fina camada de vidro aleatória resistente ao ataque químico) (MARINUCCI, 2011).

As fibras do tipo S contêm maior proporção de alumínio e sílica, o que pode apresentar um aumento de 20% a 40% das propriedades mecânicas, quando comparados ao vidro tipo E (NASSEH, 2011). O diâmetro dos filamentos é cerca de duas vezes menor que o tipo E, logo, tem aproximadamente duas vezes maior área superficial, por esta razão, proporcionam melhor aderência e aumento da adesão entre a matriz de resina e os filamentos do material (MARINUCCI, 2011). Elas também são chamadas de fibras de alto desempenho, comumente usada em balísticas e aplicações aeroespaciais (ABMACO, 2008). O fato de atenderem às exigências mais severas e contarem com produtividade mais baixa, os seus preços são de duas a cinco vezes maiores que a do tipo E (NASSEH, 2011).

A tabela 1 apresenta as principais propriedades das fibras de vidro.

Tabela 1 – Principais propriedades das fibras de vidro

<b>Propriedades</b>	<b>A</b>	<b>C</b>	<b>E</b>	<b>S</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,49	2,54	2,48
Resistência a tração (MPa) 25°C	3033	3033	3448	4585
Resistência a tração (MPa) 370°C	-	-	2620	3758
Módulo de elasticidade (GPa) 25°C	-	69	72,4	85,5
Alongamento (%) a 25°C	-	4,8	4,8	5,7

Fonte: Marinucci (2011, p. 67).

Além das fibras de vidro, na indústria náutica também é comum utilizar reforços de aramida (comumente chamado de kevlar) e fibras de carbono (NASSEH, 2011). Ambas descrita no Apêndice A.

Sendo assim, conforme apresentado na Figura 3, “[...] não existe um único tipo de fibra que reúne todas as melhores propriedades. Cada material divide boas e más propriedades. Assim, deve ser estudado um balanço de desempenho quando se projeta um laminado de uma embarcação [...]” (NASSEH, 2011, p. 72).

### 2.1.1. Tipos de Reforço

Já se sabe que as fibras têm uma incrível capacidade de tomar formas complexas, e tem o poder de aumentar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais

compósitos em uma dada direção de alinhamento das fibras (ABMACO, 2008). Isto se explica, pois no nível molecular, elas exibem propriedades ortotrópicas com resistências muito maiores na direção que são orientadas (NASSEH, 2007).

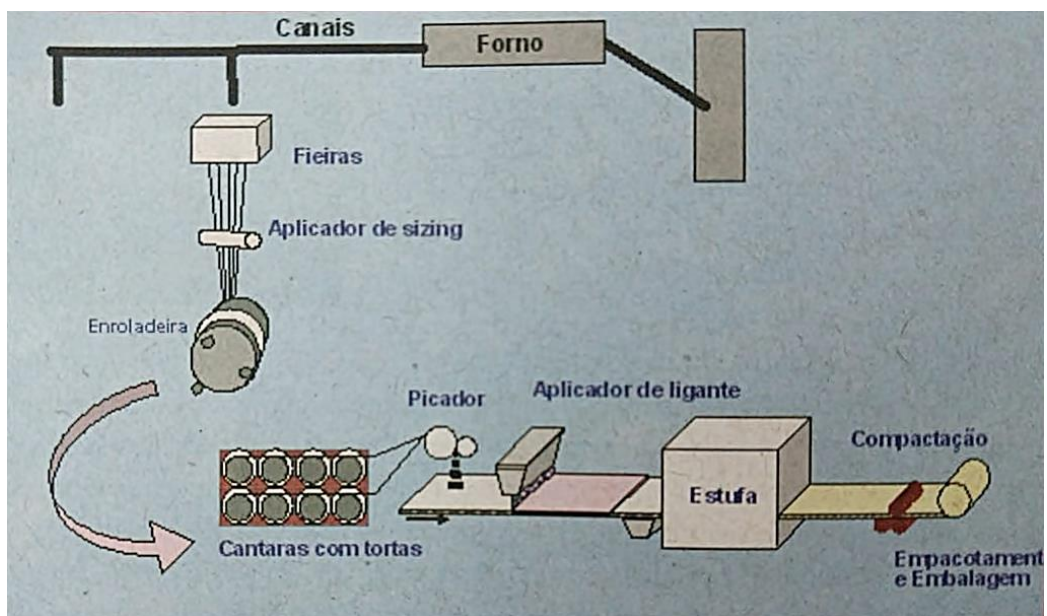
Porém, há reforços descontínuos (fibra picada) que proporcionam a vantagem de oferecer resistência em praticamente todas as direções do laminado, muitas vezes denominadas de quasi-isotrópicos (MARINUCCI, 2011).

#### 2.1.1.1. Mantas

Fibras curtas são obtidas pela fragmentação de fibras contínuas, com comprimento que podem variar de 0,6 até 5cm (CSM) (MARINUCCI, 2011). E nas mantas as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial em emulsão ou em pó que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação (MAGALHÃES et al., 2010).

As mantas são um tipo de material isotrópico, ou seja, desenvolvem a mesma tensão em qualquer direção devido a sua forma de construção (Figura 5) (NASSEH, 2008).

Figura 5 – Processo de fabricação de mantas



Fonte: ABMACO (2008, p. 256).

A compactação promove o contato do ligante com as fibras e aumenta a resistência à tração da manta (ABMACO, 2008). As mesmas possuem vantagens de fácil aplicação,

excelente molhabilidade e boa moldabilidade, e produzir laminados mais homogêneos e de espessura controlada se comparadas ao de fibra picada (MARINUCCI, 2011).

#### 2.1.1.2. Tecido

Diferente das mantas, o tecido de fibra de vidro possui orientação, e sua estrutura são responsáveis pela transferência das tensões através da matriz da resina (NASSEH, 2008).

A montagem das fibras na direção do fio, chamada de urdume, e na direção transversal, denominada de trama, permite a fabricação de tecidos que conferem ao compósito resistência em duas direções (2D) (MARINUCCI, 2011). Os tecidos 3D distinguem-se do 2D por possuírem fibras orientadas na direção da espessura, fato que confere melhor resistência interlaminar ao compósito (MAGALHÃES et al., 2010).

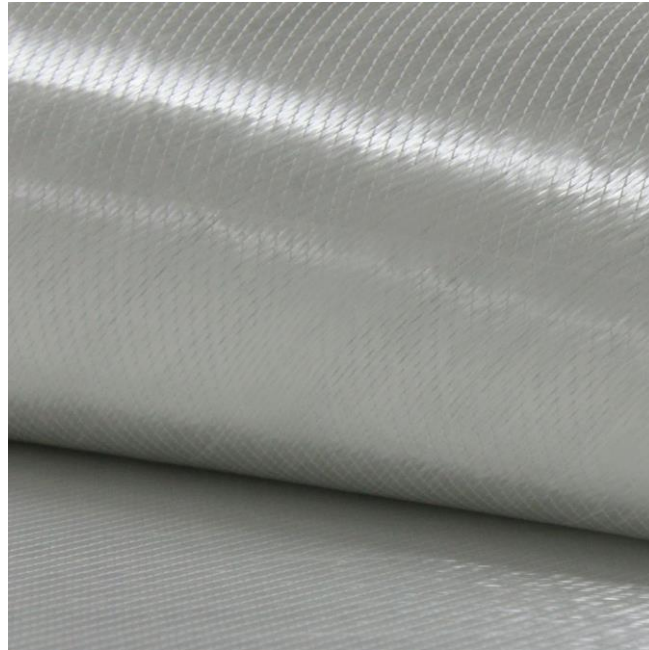
O tipo de filamento, a interação da sua superfície com a matriz de resina, a quantidade de resina e, finalmente, a orientação do reforço são as características das fibras de reforço que irão governar o desempenho final do laminado (NASSEH, 2008).

Os tecidos tramados são normalmente laminados intercalando-os com camadas de mantas (NASSEH, 2008), visto que dois tecidos laminados (um sobre o outro) produzem um laminado com baixa resistência interlaminar (ABMACO, 2008) e a manta proporciona maior aderência entre as camadas de tecido, assim, melhorando a resistência interlaminar (NASSEH, 2008). Estes materiais, cujas propriedades mecânicas são totalmente dependentes da direção são conhecidos como ortotrópicos (NASSEH, 2007).

A forma mais comum de construção dos tecidos é a balanceada, onde cada direção do tecido tem o mesmo número de fios, proporcionando uma resistência equilibrada às propriedades mecânicas em ambas as direções (NASSEH, 2007).

A forma de construção dos tecidos, também está diretamente ligada a caracterização. Magalhães et al. (2010) afirmam que são caracterizados pela orientação das fibras e empregues e classificados pela massa por área, tal como as mantas (Figura 6).

Figura 6 – Tecido biaxial de fibra de vidro +45/-45 com 400g/m<sup>2</sup>



Fonte: Tecido (2019, p. 1).

## 2.2. RESINAS

As resinas de maneira geral são polímeros sintéticos (NASSEH, 2007), na sua maioria, são líquidos à temperatura abaixo de 50°C, o que propicia a vantagem de serem processados quando ainda líquidos, na temperatura ambiente (MARINUCCI, 2011).

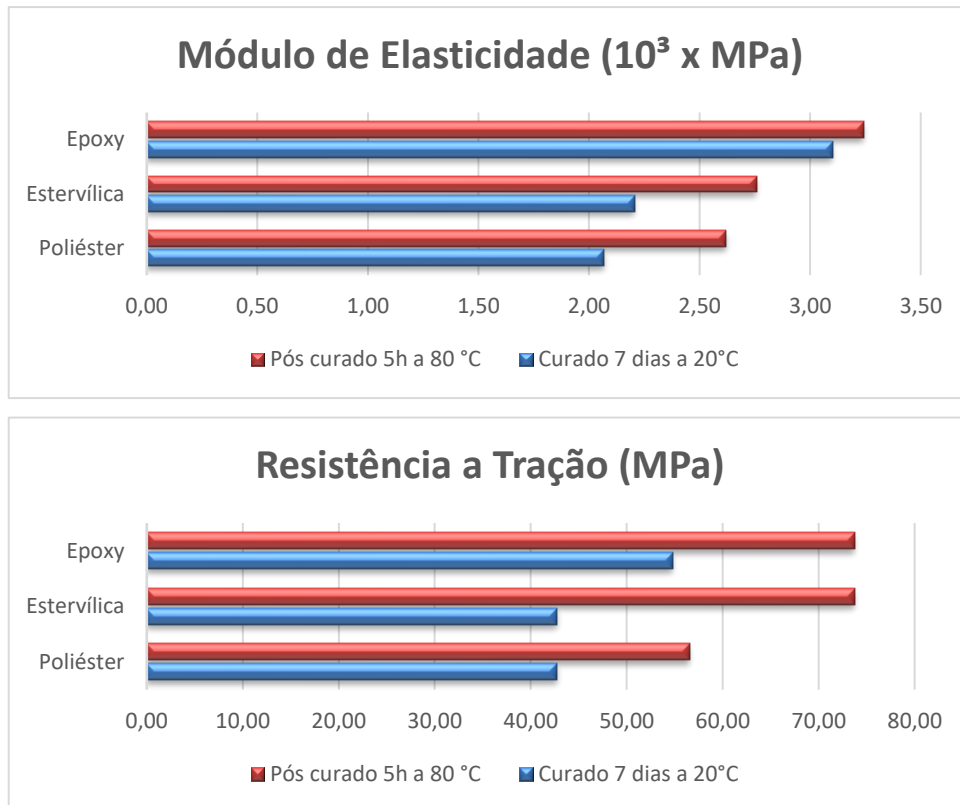
Diferente dos polímeros termoplásticos, que fundem e fluem sob efeito de temperatura e pressão e endurecem quando resfriados (MARUNCCI, 2011), as resinas são polímeros termofixos ou termorrígidos e a solidificação é obtida pela adição de agentes de cura ao polímero (MAGALHÃES et al., 2010), onde a presença de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas permite a formação de uma estrutura tridimensional no polímero, tornando-o infusível e insolúvel, e desse modo sem a possibilidade de reciclagem (MARINUCCI, 2011).

O tipo de ligação entre cadeias é responsável pelo comportamento característico dos termorrígidos, isto é, de não serem facilmente conformados e reprocessados através apenas da ação conjunta entre pressão e temperatura (ABMACO, 2008). Neste contexto, quando este polímero tem ligações cruzadas muito fortes para serem rompidas por aquecimento moderado, eles são chamados de termofixos ou termorrígidos, e podem gerar resinas como por exemplo do tipo: poliéster insaturado, estervinílica e epóxi (NASSEH, 2007).

A Figura 7 exhibe as propriedades mecânicas das resinas.



Figura 7 – Propriedades mecânicas das resinas



Fonte: Nasseh (2011, p. 96).

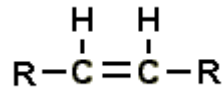
### 2.2.1. Resina Poliéster Insaturado

As resinas poliéster são compostos orgânicos derivados do petróleo que passam do estado líquido para o sólido através de polimerização (POLIRESINAS, 2019). Onde a adição de agentes de cura que, quando convenientemente curados (polimerizado), forma um material sólido que apresenta boas propriedades mecânicas e excelente resistência química (MARINUCCI, 2011). Convenientemente chamado de matriz polimérica (NASSEH, 2007).

A matriz polimérica reunida com as fibras e outros elementos como carga, absorvedores de ultravioleta e retardante de chamas, por exemplo, constituem os materiais compósitos poliméricos (MARINUCCI, 2011).

O termo poliéster insaturado indica que qualquer um dos reagentes na sua composição contém insaturação (POLIRESINAS, 2019). E o termo “insaturado” é proveniente da presença de duplas ligações presentes na sua cadeia molecular (Figura 8) (ABMACO, 2008).

Figura 8 – Poliéster Insaturado



Fonte: ABMACO (2008, p. 45).

Estas insaturações são produzidas pela reação de ácidos insaturados, onde os mais comuns são o ácido fumárico e o anidrido maleico, em combinação com um ácido do tipo orto ou isoftálico, juntos glicol, como o propileno-glicol ou etileno-glicol, e dissolvidos em um monômero reativo normalmente estireno (NASSEH, 2011, p. 100).

Segundo Magalhães et al. (2010), “[...] as resinas de poliéster insaturado são as mais utilizadas no fabrico de materiais compósito, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, elétricas e químicas.” (p. 27). Isto faz-se da resina poliéster uma boa escolha para muitas aplicações náuticas (NASSEH, 2011).

As resinas estervinílicas e epóxi também são usualmente utilizadas na náutica e estão descritas no Apêndice A.

### 2.3. MECANISMOS DE CURA

Como mencionado em seções anteriores, a cura de um laminado está diretamente relacionada ao tipo de iniciador e a dosagem do mesmo. Fatores como temperatura, humidade relativa do ar e pressão também influenciam durante o processo de cura (ABMACO, 2008).

As laminações com resinas estervinílicas utilizam os mesmos iniciadores que as poliésteres (MEK/Co) com dosagem entre 1% e 2%, onde não se deve utilizar dosagem inferior a 1%, pois pode promover a cura incompleta do laminado (MARINUCCI, 2011). Porém, as resinas epóxis podem ser curadas com vários agentes de cura, também chamados de endurecedores (ABMACO, 2008) e a taxa resina/endurecedor pode variar em 100:12, 100:25, 100:30 e até mesmo 100:50 (NASSEH, 2011). Por exemplo os anidridos, que são usados principalmente em sistemas de curas a quente, pois dificilmente reagem em temperatura ambiente (ABMACO, 2008).

Assim, o processo de cura das matrizes poliméricas pode ser caracterizado por quatro etapas: tempo de gel, de pico exotérmico, tempo de desmoldagem e tempo de cura (MARINUCCI, 2011).

O tempo de gel ou gelltime, estabelece o tempo em que a temperatura da matriz praticamente não varia, mantendo sua consistência líquida e permitindo a sua manipulação (NASSEH, 2008). É nesse intervalo de tempo que será possível impregnar as fibras e acomodá-las adequadamente no molde (MARINUCCI, 2011). Após atingido o gelltime, a temperatura da massa apresenta uma elevação significativa, até ser atingida a temperatura máxima ou temperatura de pico (MARINUCCI, 2011), pois a cura é um processo exotérmico, ou seja, liberação de calor (ABMACO, 2008). O tempo de desmoldagem, não necessariamente é o tempo de cura, porque muitas vezes a peça pode ser desmoldada e mantida sob determinadas condições até que seja estabelecida a cura total da matriz (MARINUCCI, 2011).

### 2.3.1. Grau de Cura

O método mais comum para determinar o grau de cura das resinas é pela dureza Barcol (NASSEH, 2011), onde a superfície plana e rígida deve ser apoiada sobre o durômetro Barcol, e este medirá a resistência que a resina oferece a penetração de uma agulha padrão comprimida nela com uma força também padronizada (Figura 9) (NASSEH, 2007).



Fonte: Marinucci (2011, p. 55).

Normalmente os valores finais de dureza estão entre 40 e 50, mas isso depende basicamente do tipo de resina que se está utilizando (NASSEH, 2011).

Em temperatura ambiente (25°C), um laminado curado com MEKP e cobalto, o estireno, responsável por realizar as interligações cruzadas com a resina, estabiliza após 1 semana (NASSEH, 2007), logo o estireno residual não é mais capaz de promover interligações e eficientes para promover propriedades mecânicas e química a resina (MARINUCCI, 2011).

Quando é preciso obter melhores propriedades mecânicas, poderá ser necessário proporcionar ao conjunto final uma pós-cura em temperaturas elevadas (NASSEH, 2011). Em geral, quanto maior a temperatura menor será o tempo necessário para se obter as propriedades totais do laminado (ABMACO, 2008). Entretanto, essa temperatura de cura não deve superar o valor máximo da temperatura de deformação térmica do laminado (HDT), que normalmente é próxima à temperatura de transição vítrea da resina ( $T_g$ ) (NASSEH, 2011).

### 3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

A incorporação do reforço à resina consiste normalmente na impregnação das fibras sob as mais diversas formas. E a forma final do produto é obtida pela conformação do composto através de moldes e processos de moldagem para cada caso (AURÉLIO, 2014).

Grande parte dos processos de fabricação no Brasil utiliza o sistema de impregnação da fibra no momento da fabricação da peça, ficando restrito a determinadas estruturas aeroespaciais, componentes de automóveis de competição e alguns artigos esportivos o uso de material pré-impregnados (MARINUCCI, 2011). Então, quando se fala em laminações de barcos, é mais comum utilizar o sistema de impregnação na fabricação (wet system) (NASSEH, 2011).

Exemplo de wet systems são os processos de laminação manual (hand lay-up), laminação por projeção (spray-up), laminação a vácuo e infusão (MARINUCCI, 2011). Sendo que cada processo contém suas vantagens e desvantagens e aplicações (MAZUNDAR, 2002), e cabe ao projetista junto ao amador definirem a melhor escolha para o processo de fabricação (NASSEH, 2011).

#### 3.1. LAMINAÇÃO MANUAL (HAND LAY-UP)

Embora a laminação manual seja um dos processos mais simples e antigos empregados na fabricação de compósitos, hoje em dia, ela continua sendo utilizada devido ao seu pouco equipamento requerido de baixo custo (NASSEH, 2011).

O processo permite uma fácil assimilação, tornando-se um negócio atraente. Essa facilidade, no entanto, pode criar uma falsa expectativa, pois a ausência do conhecimento que o material exige tem afetado a imagem dos compósitos no mercado consumidor, contribuindo para a formação de uma opinião errada de que o material é “fraco” ou inadequado às necessidades da engenharia (MARINUCCI, 2011, p. 174).

O método de laminar manualmente é visto na indústria náutica na fabricação de moldes, protótipos, peças e algumas embarcações de pequeno porte (MAZUNDAR, 2002). Porém com a proliferação de métodos mais modernos, como a laminação a vácuo, infusão e RTM, a laminação manual deixou o chão da maioria das fábricas de compósitos que tentam ser competitivas (NASSEH, 2008).

Mesmo sendo uma técnica ultrapassada e convencional, ela é a base para o conhecimento dos processos mais complexos. E sem um bom entendimento dos potenciais erros propensos a serem cometidos nesta técnica, torna-se difícil conseguir um bom produto através de métodos mais avançados de laminação (NASSEH, 2008, p. 10).

### 3.1.1. Processo

Inicia-se o processo com a preparação do molde aberto, também chamado de fôrma, aplicando um agente desmoldante sobre o mesmo (NASSEH, 2008). Este agente além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, também evitará a aderência da peça ao molde, contribuindo para um melhor acabamento na superfície do laminado (ABMACO, 2008). Abmaco (2009) ainda diz que a sua aplicação deve ser feita com o molde limpo e seco.

Especialmente na fabricação de peças utilizando fibra de vidro, a superfície do molde, após a preparação, limpeza e aplicação de agentes desmoldantes, sugere-se a aplicação de uma camada de resina (gelcoat) que tem características especiais (MARINUCCI, 2011), e confere ao compósito propriedades importantes como: proteger contra intempéries, raios ultravioletas e ação da água, permitir acabamento liso, colorido e brilhante na superfície da peça, melhorando a estética (NASSEH, 2008), servir como base para a aplicação de tinta em superfície que necessitam de pintura (MARINUCCI, 2011).

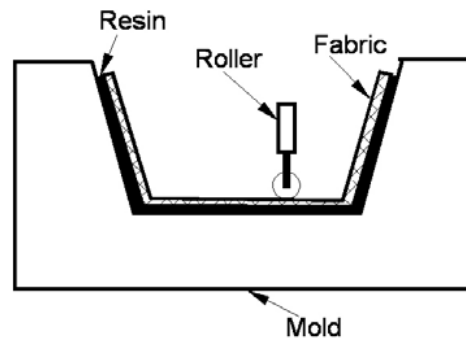
Antes de iniciar a laminação sobre o gelcoat, Abmaco (2009, p. 30) afirma que “o ponto exato ocorre quando ao tocar a superfície do gel com os dedos, este apresenta adesividade (tacky), porém sem tingir os dedos. Nasseh (2008, p. 21) também afirma que o geltime (tempo de cura do gelcoat) varia com a quantidade de catalisador, estando normalmente entre 1% à 2%.

Feito isto, inicia-se o processo de laminar colocando sucessivas camadas de reforços impregnados pela matriz (MARINUCCI, 2011). Carvalho (2012) diz que tantos os reforços manta-tecido e resina são postos manualmente. As bolhas de ar aprisionadas neste momento, são retiradas por rolos e pinceis (NASSEH, 2008).

Nasseh (2008) simplifica que o processo de laminação manual se baseia em colocar vários reforços de fibra sobre um molde e em seguida aplicar resina sobre eles, e manualmente tentar dispersar a resina de modo uniforme e esperar até a polimerização da mesma (Figura 10).

Para Abmaco (2009, p. 31): “Laminação de até 4 ou 5 camadas subsequentes podem ser ininterruptas. Acima deste número, deve-se aguardar a redução da exotermia antes de retomar, sob o risco de provocar empenamentos, distorções e contrações acentuadas no produto moldado”.

Figura 10 - Processo de laminação manual



Fonte: Mazundar (2002, p. 146).

### 3.1.2. Equipamentos

Normalmente são empregados os seguintes equipamentos:

- Equipamentos de proteção individual (EPT s) (MARINUCCI, 2011);
- Exaustão na área de laminação (MARINUCCI, 2011);
- Roletes para compactação do laminado (ABMACO, 2008);
- Tesouras e facas especiais para corte de mantas e tecidos (ABMACO, 2008);
- Espátula e estilete para rebarbagem (ABMACO, 2009);
- Pistola para aplicação do gel coat (ABMACO, 2009);
- Pincéis de cerdas duras e trinchas para aplicação da resina. Devem resistir ao ataque do estireno presente em resinas poliméricas e dos solventes usados na limpeza (ABMACO, 2008 e 2009);
- Desmoldante para facilitar a desmoldagem da peça do molde (NASSEH, 2008);
- Cunhas para auxílio de desmoldagem (ABMACO, 2009);
- Dosadores de reagentes: bombas dosadoras, balança para pesagem ou frascos graduados (ABMACO, 2008 e 2009);
- Solventes para limpeza dos pincéis, roletes e outros equipamentos (ABMACO, 2009);
- Lixadeiras para acabamento (ABMACO, 2009).

### 3.1.3. Vantagens e Desvantagens

A grande vantagem desse processo é o baixo custo de investimento, porque existe um custo insignificante de equipamentos comparados aos outros processos (MAZUNDAR, 2002). Também é um processo é muito simples e versátil, pois qualquer material do tipo de fibra pode ser selecionado com qualquer orientação (MAZUNDAR, 2002) e laminado no campo de trabalho, facilitando uma possível reparação (MARINUCCI, 2011).

A grande desvantagem deste processo é que o teor de fibras fica em torno de 20% e 30% (NASSEH, 2011), e a qualidade da laminação depende da habilidade do operador (MARINUCCI, 2011). Assim, é um processo pouco reprodutível (ABMACO, 2008), onde a qualidade das peças produzidas não é consistente de uma parte para outra (MAZUNDAR, 2002). Outra desvantagem, é que é um processo poluidor e insalubre (NASSEH, 2011), devido a sua natureza de molde aberto, a emissão de estireno é uma grande preocupação (MAZUNDAR, 2002).

#### **3.1.4. Aplicações**

Na área náutica, este processo é empregado na fabricação de barcos de passeio monocasco e multicasco (ABMACO, 2008). Mazundar (2002) comenta que este método também é empregado na construção de protótipos, moldes, gabaritos de controle e modelos.

Demais processos de fabricação como laminação por projeção (spray-up), laminação a vácuo e infusão estão no Apêndice B.



## 4. FALHA E FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os compósitos apresentam propriedades que são dependentes da correta seleção das matérias-primas; do projeto estrutural e análise estrutural (NASSEH, 2011). Portanto, devem-se levar em considerações aspectos tais como carga, condições de uso e condições de exposição ao meio ambiente, processo de fabricação e orientação das camadas de fibra, sequência de posicionamento das mesmas e polimerização da matriz (MARINUCCI, 2011).

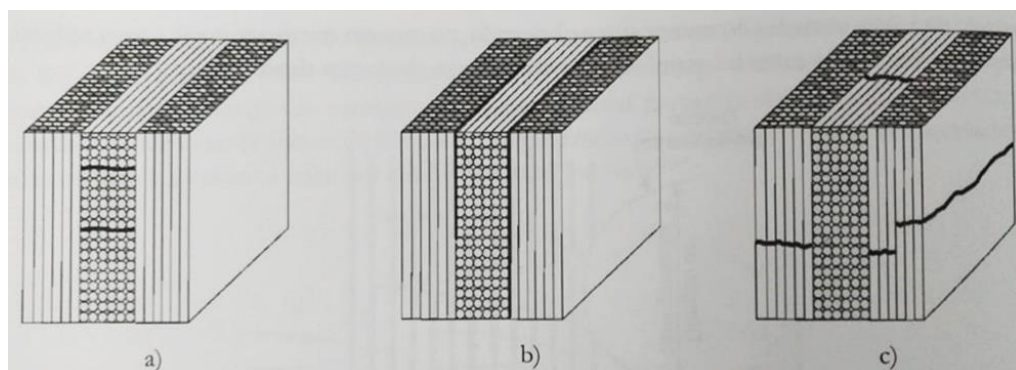
Esse capítulo apresentará os mecanismos de falha e os modos básicos de fratura exibidos pelos compósitos poliméricos com reforço contínuo quando submetidos a esforços de cisalhamento e de tração nas direções longitudinal. E por fim será apresentado o modelo de união por sobreposição simples e os fenômenos físicos envolvidos quando o mesmo sofrer esforços de tração longitudinal.

### 4.1. TIPOS DE MODOS DE FALHA

Qual membro sujeito a uma carga, pode falhar segundo duas categorias básicas para a falha estática: falha por distorção (tensão de escoamento) e fratura, cuja modalidade de falha é definida pela separação de um membro em dois ou mais fragmentos (AL-QUERESHI, 2010).

Nos compósitos poliméricos, a falha ocorre através de fraturas, denominadas fratura frágil (MARINUCCI, 2011). E a fratura frágil normalmente é associada a tensão de ruptura, e acompanha uma pequena distorção (AL-QUERESHI, 2010). Marinucci (2011) também afirma que a falha em materiais compostos pode ser dividida em três tipos: intralaminar (a), interlaminar (b) e translaminar (c) (Figura 11).

Figura 11 – Tipos de falha nos compósitos poliméricos



Fonte: Marinucci (2011, p. 250).

#### **4.1.1. Falha Intralaminar**

Trata-se da rotura das camadas do compósito, que pode acontecer sob a forma de rotura da matriz, rotura das fibras e descoesão fibra/matriz (MAGALHÃES et al., 2010). Ou seja, estas falhas são localizadas internamente nas camadas do laminado (MARINUCCI, 2011).

#### **4.1.2. Falha Interlaminar**

A falha interlaminar designa-se habitualmente por delaminação, e normalmente ocorre entre camadas diferentemente orientadas (MAGALHÃES et al., 2010).

A delaminação, uma das falhas mais presentes, ocorrem em planos paralelos aos das camadas e seus mecanismos de falha e aparência tendem a ser denominados por fratura na matriz e separação da fibra da matriz (MARINUCCI, 2011).

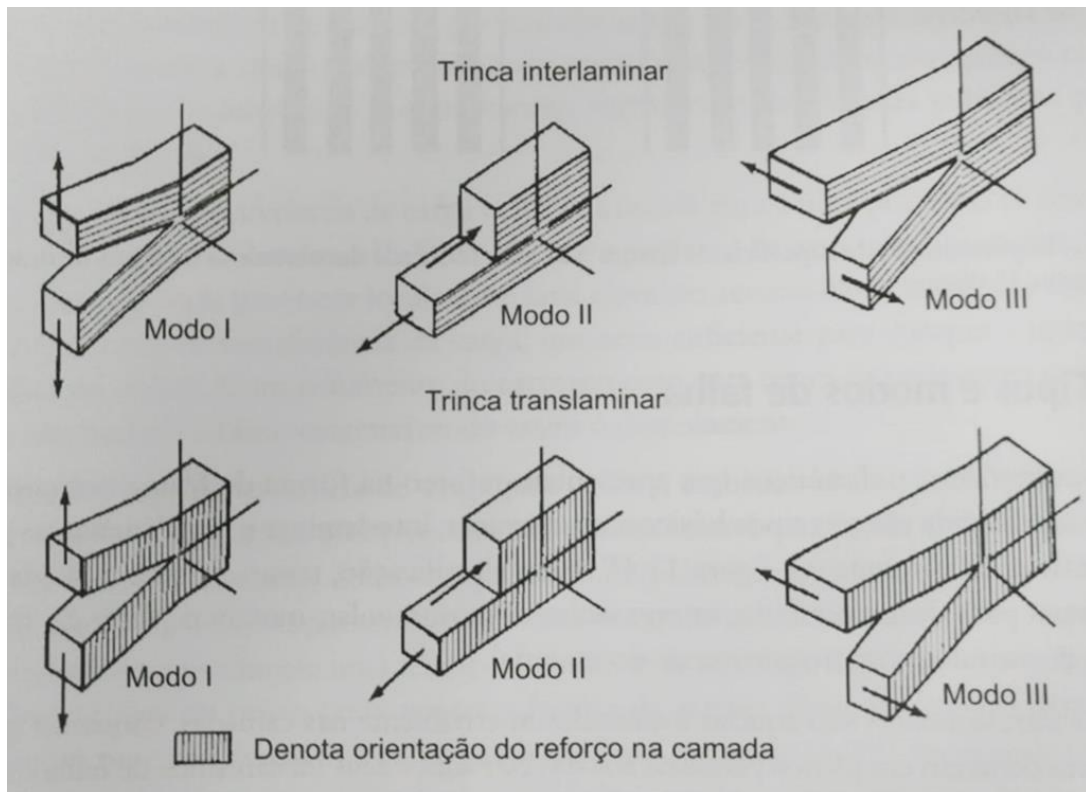
Nasseh (2007), afirma que “[...] para prevenir a delaminação, intercalam-se camadas de manta com um maior teor de resina entre os tecidos. Esta é a principal razão por que, normalmente, barcos de produção são construídos com tecidos biaxiais combinados com manta”. (p. 29).

#### **4.1.3. Falha Translaminar**

Diferente da interlaminar, as falhas translaminares são orientadas transversalmente ao plano do laminado e quando são decorrentes de tração, exibem uma topografia desigual, cujo aspecto dominante é a presença de fibras quebradas (MARINUCCI, 2011).

A falha para os tipos interlaminar e translaminar pode ocorrer segundo três modos: Modo I, modo II, modo III (Figura 12). Entretanto, atenção deve ser dada à orientação do reforço na camada, pois, para uma mesma condição de tensão, podem ocorrer trincas interlaminares ou translaminares no material. (MARINUCCI, 2011, p. 250).

Figura 12 – Modos de falha nos compósitos poliméricos



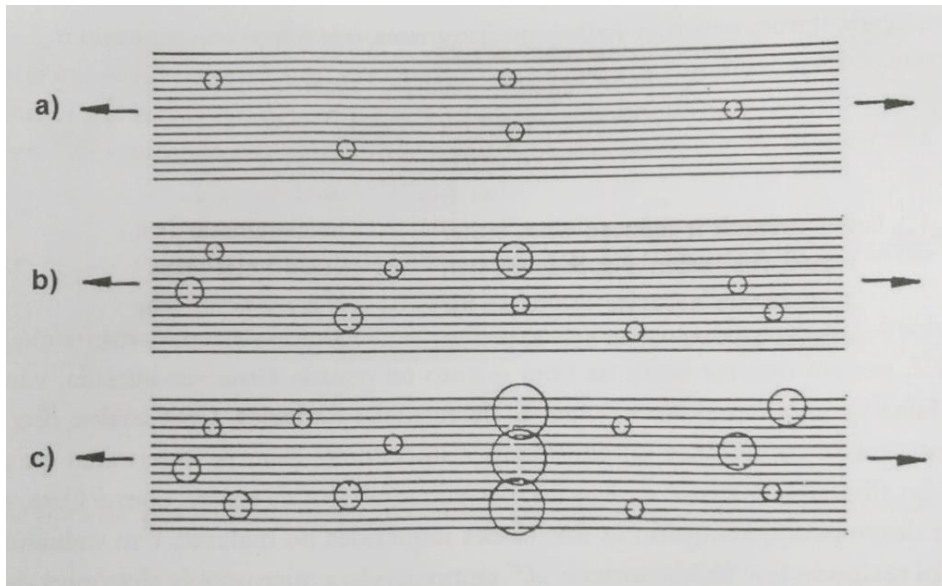
Fonte: Marinucci (2011, p. 250).

#### 4.2. TRAÇÃO LONGITUDINAL

A resposta mecânica neste tipo de compósito depende de vários fatores, incluindo os comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a carga é aplicada (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Lâminas com fração volumétrica de fibra abaixo de 40% apresentam fratura característica de materiais frágeis que a princípio ocorrem quebras alternadas de filamentos (a) e conforme a tensão aumenta, outros filamentos são quebrados (b) e ocorre a trinca/falha (c) (Figura 13) (MARINUCCI, 2011).

Figura 13 – Sequência de fratura frágil

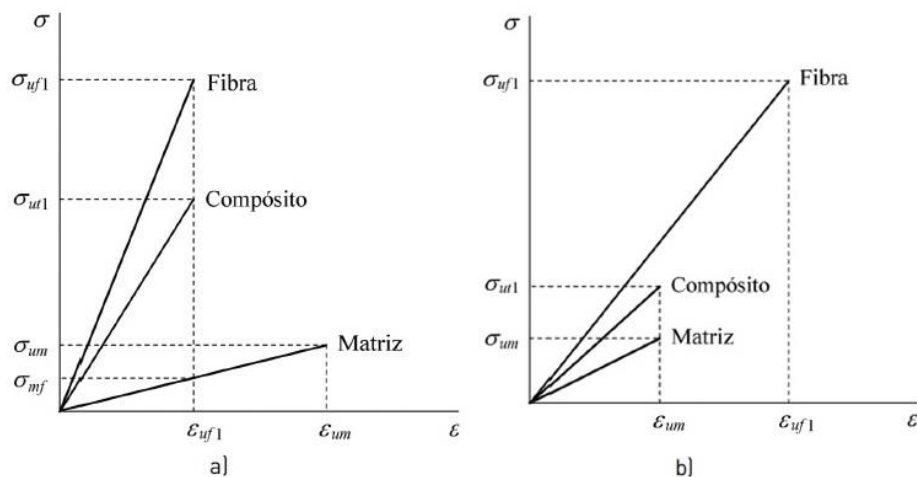


Fonte: Marinucci (2011, p. 252).

Segundo Magalhães et al. (2010), “os laminados +45/-45 não estão sob um corte puro, havendo um processo gradual de ruptura relativamente complexa, que envolve a formação de fissuras transversais e de delaminações, bem como não-linearidades material e geométricas que provocam rotações consideráveis das camadas. Assim as deformações máximas no ensaio são bastante elevadas.” (p. 321).

Numa primeira análise a nível micromecânica, a ruptura do compósito inicia-se quando for atingida a deformação da fibra,  $\varepsilon_{uf1}$ , ou da matriz  $\varepsilon_{um}$ . Torna-se por isso necessário considerar dois casos:  $\varepsilon_{uf1} < \varepsilon_{um}$  (Figura 14a) e  $\varepsilon_{uf1} > \varepsilon_{um}$  (Figura 14b) (MAGALHÃES et al., 2010).

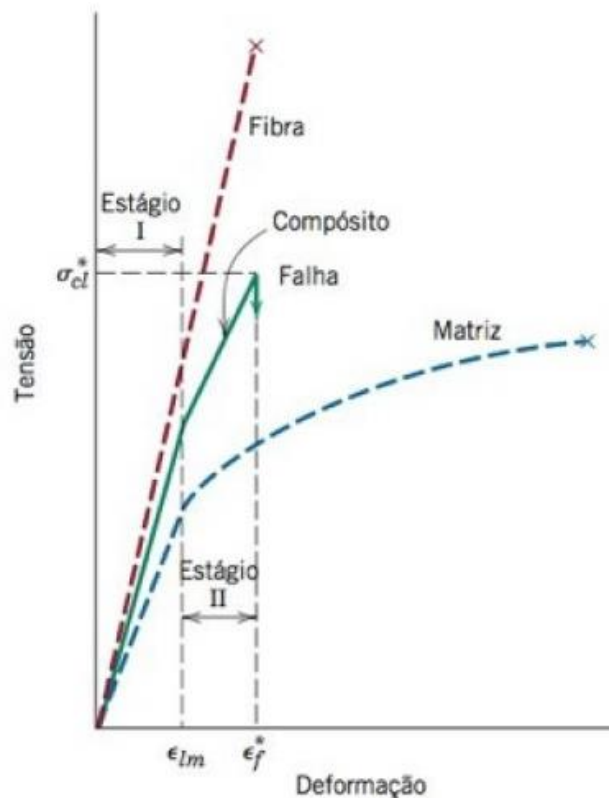
Figura 14 – Representação de dois casos possíveis de ductibilidade relativa dos constituintes e suas repercussões na resistência de compósito



Fonte: Magalhães et al. (2010, p. 111).

No ponto de vista das aplicações estruturais, é claramente desejável a primeira situação (Figura 14a), para que se aproveite em pleno a elevada resistência das fibras (MAGALHÃES et al., 2010). Pois no caso (a) (Figura 15), durante o estágio I tanto a fibra quanto a matriz se deforma elasticamente, normalmente essa parte da curva é linear (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Figura 15 – Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas, exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento



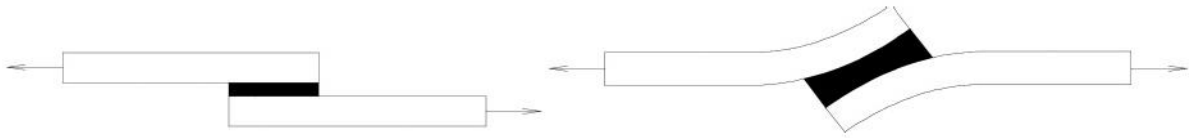
Fonte: Callister e Rethwisch (2010, p. 543).

No estágio II, a matriz escoia e deforma-se plasticamente em  $\epsilon_{lm}$ , enquanto as fibras continuam a se alongar elasticamente, uma vez que o limite de resistência à tração das fibras é significativamente maior que o limite de escoamento da matriz (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Ou seja, na prática, as matrizes poliméricas são mais dúcteis do que as fibras, embora por vezes com valores de  $\epsilon_{lm}$  relativamente baixos (MAGALHÃES et al., 2010). Portanto, após a falha da fibra, a matriz ainda está intacta, já que  $\epsilon_{uf1} < \epsilon_{um}$  (Figura 14a), logo, as fibras fraturadas (mais curtas que as fibras originais), ainda são capazes de suportar uma carga reduzida enquanto a matriz deforma-se plasticamente (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

### 4.3. UNIÃO POR SOBREPOSIÇÃO

As uniões por sobreposição são fáceis de serem obtidas, porém as forças atuantes normalmente não são lineares, fato que pode fazer com que atuem tensões de arrancamento nas extremidades das sobreposições (Figura 16) (ABMACO, 2009).

Figura 16 – Representação esquemática da deformação de união de sobreposição simples



Fonte: Magalhães et al. (2010, p. 354).

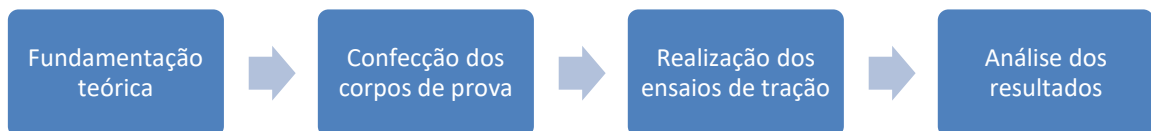
As tensões de arrancamento podem causar o cisalhamento interlaminar no compósito, sendo uma propriedade que depende muito da performance da resina e, outra vez, da sua resistência e poder de adesão (NASSEH, 2007).

## 5. METODOLOGIA

Inicialmente foi feito a fundamentação teórica pesquisando na literatura os processos, equipamentos, vantagens e desvantagens e aplicações dos métodos de obtenções de compósito comumente utilizados na indústria náutica. A seguir, foram confeccionados os corpos de prova e submetidos ao ensaio de tração. Após o término do ensaio, foram analisados os resultados obtidos.

A metodologia geral está representada na Figura 17.

Figura 17 – Metodologia geral



Fonte: O Autor (2019).

### 5.1. MATERIAIS

Todos os corpos de prova foram confeccionados por reforços de fibra de vidro tipo E com tecido biaxial +45/-45 com 400g/m<sup>2</sup>, manta 450g/m<sup>2</sup> (Anexo A) e resina poliéster insaturada ortofitálica (Anexo B) iniciada com 1% Brasnox DM50 (Anexo C).

O gelcoat não foi utilizado para facilitar os processos de laminação sem, contudo, prejudicar a comparação dos resultados. Além disso, um bom acabamento das amostras não se faz necessário para a realização dos ensaios.

Como solução de limpeza, foi utilizado Quimsolv-A (Anexo D) e agente desmoldante TecGlaze-N.

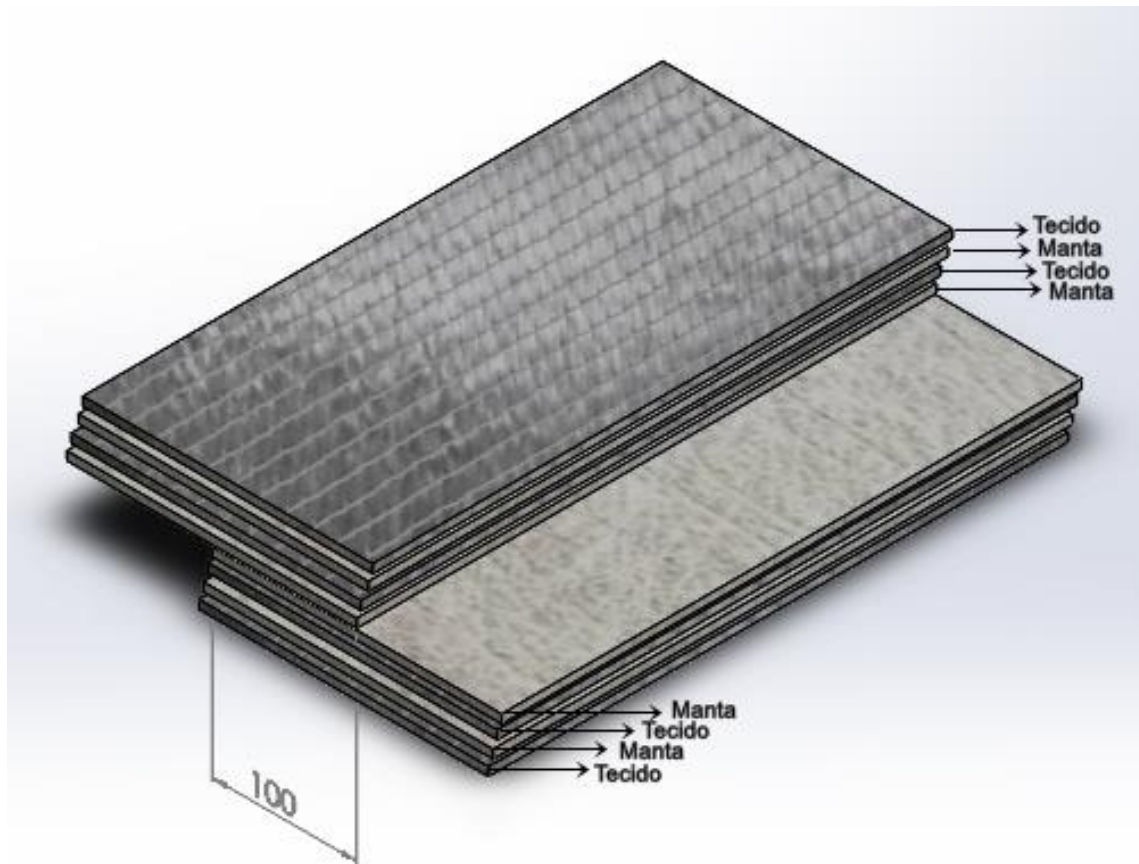
Os itens e equipamentos utilizados para a confecção dos corpos de prova foram: tesoura, pincéis, rolete, espátula, estilete, lixa para ferro 100, vasilhas plásticas, palitos de madeira descartáveis, balança, régua, canaleta de alumínio para guia, serra circular manual com disco de corte para fibra, bureta graduada e além de equipamentos de EPIs como: óculos, luvas, máscara para gases e pó e jaleco.

## 5.2. CORPOS DE PROVA

A fabricação dos corpos de prova será realizada através do processo de laminação manual, pois chegou-se à conclusão que o processo proporciona resultados satisfatórios para utilizar como parâmetros de comparação, além de que, como dito por Nasseh (2008, p. 10) “Mesmo sendo uma técnica ultrapassada e convencional, ela é a base para o conhecimento dos processos mais complexos”. E sem um bom entendimento dos potenciais erros propensos a serem cometidos nesta técnica, torna-se difícil obter um bom laminado com técnicas mais avançadas de laminação (NASSEH, 2008).

Então através do processo de laminação manual, serão confeccionados 10 corpos de prova com união de manta com a disposição das camadas representada na Figura 18, e 10 corpos de prova sem a presença de manta na união (com união sem manta) com a disposição das camadas representada na Figura 19. Ambas uniões têm comprimento de 100mm.

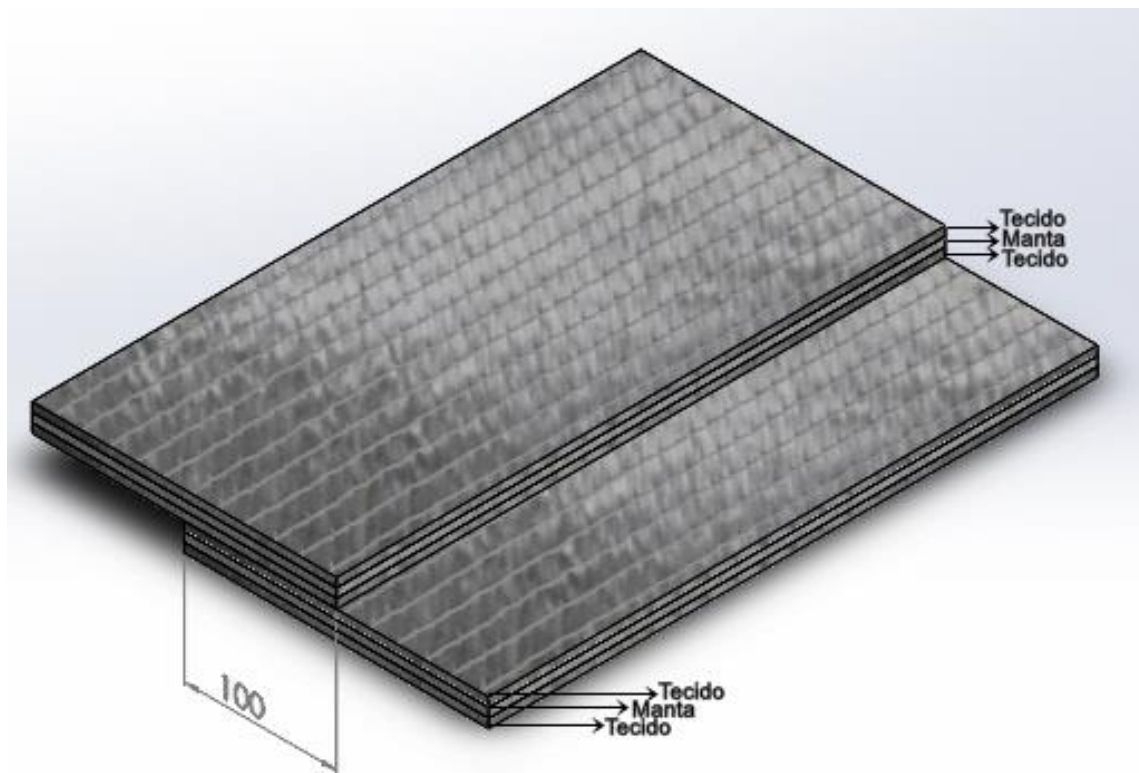
Figura 18 – Disposição das camadas dos CPs com união de manta



Fonte: O Autor (2019).



Figura 19 – Disposição das camadas dos CPs com união sem manta



Fonte: O Autor (2019).

Também serão confeccionados 16 corpos de prova que representam as camadas sem união, ou seja, são as camadas do laminado que não compõem a região de 100mm de comprimento mencionada. Sendo que dos 16 corpos de prova, 8 compreendem o laminado com união de manta e os 8 restantes compreendem o laminado com união sem manta.

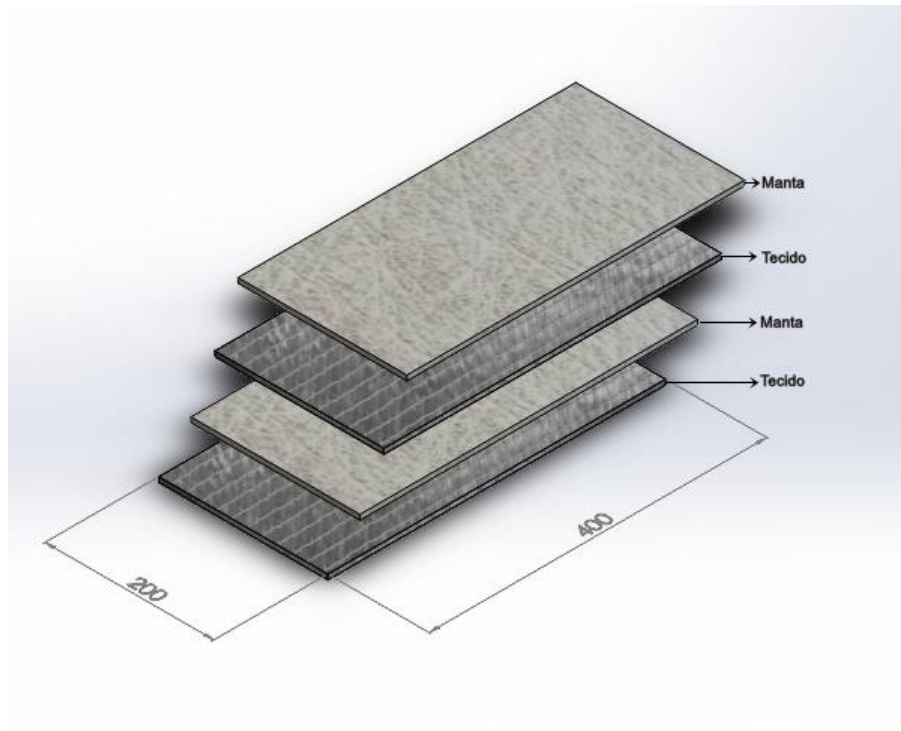
O objetivo destes novos corpos de prova é eliminar a hipótese de que a fratura dos cps com união submetidos ao ensaio de tração pudesse ocorrer fora da região de interesse, ou seja, fora da união. E essa hipótese é eliminada se os corpos de prova sem união (denominados de contínuos) obterem uma resistência a tração superior aos cps com união.

Isto significa dizer que a região fora da união possui uma resistência a tração maior que na união, logo, os corpos de prova irão sempre fraturar na região compreendida como união por sobreposição simples.

Na Figura 20 está representado o perfil dos CPs contínuos do laminado com união de manta (denominado CP contínuo com manta) e a Figura 21 representa o perfil do laminado dos CPs contínuos do laminado com união sem manta (denominado CP contínuo sem manta). Pois

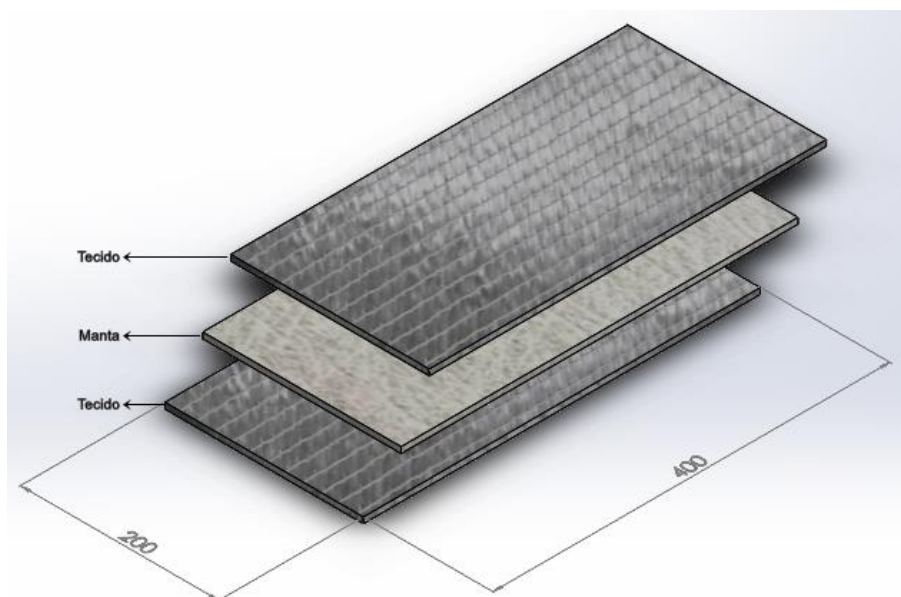
a diferença entre eles está na última camada de laminação (com ou sem manta). Esta denominação é para facilitar a compreensão.

Figura 20 – Disposição das camadas dos CPs contínuo com manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 21 - Disposição das camadas dos CPs contínuos sem manta



Fonte: O Autor (2019).

Após a cura dos laminados, ambos serão recortados conforme a norma ASTM 3039/3039M que normatiza o ensaio de tração em compósitos e serão submetidos ao ensaio.

Os dados obtidos serão apresentados e analisados.

## 6. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Esse capítulo descreverá o procedimento detalhado desde a confecção dos corpos de prova ao ensaio de tração.

No Apêndice C está descrito o imprevisto ocorrido durante a laminação com o uso de um tecido contaminado do tipo woving roving de 300g/m<sup>2</sup>. Desta forma, houve a substituição do tecido contaminado por um tecido de fibra de vidro +45/-45 de 400g/m<sup>2</sup>.

### 6.1. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM UNIÃO DE MANTA

Com temperatura ambiente de 25°C e humidade relativa do ar de 76%. Iniciou-se o processo de laminação preparando a superfície do molde retirando as rugosidades com uma espátula e limpando-a com a solução de limpeza.

Feito isto, aguardou-se 20 minutos e foi aplicado ao molde de vidro uma fina camada de agente desmoldante.

Enquanto aguardava-se a secagem do desmoldante (cerca de 30 minutos), foi pesado o tecido e manta (Figura 22), com uma relação 80:20 de resina/fibra, pesou-se a resina (Figura 23).

Figura 22 – Pesagem do tecido biaxial +45/-45 e manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 23 – Pesagem da resina



Fonte: O Autor (2019).

Passado 30 minutos, foi iniciado o processo de laminação, começando com a deposição de uma pequena quantidade de resina sobre o molde, espalhando homogeneamente com a ajuda de um pincel. Na sequência, colocou-se o tecido impregnando-o com resina e compactando-o com rolete tira bolha. Posteriormente, foi acrescentado a manta, e novamente, impregnada com resina com auxílio do pincel e compactando e retirando bolhas de ar com rolete de aço tira bolhas.

Após 12 horas de aguardo, o resultado desta laminação está na Figura 24.

Figura 24 – Laminação de tecido biax45 e CSM



Fonte: O Autor (2019).

No dia seguinte (após 12 horas), o procedimento foi repetido para novas camadas de laminação (tecido e manta).

Mas antes disso, foi lixada a superfície da laminação com uma lixa grossa 100, com intuito de planar a superfície melhorando a aderência (NASSEH, 2011) e suaviza-la para as próximas camadas (Figura 25).

Figura 25 – Lixamento da superfície do laminado tecido + manta

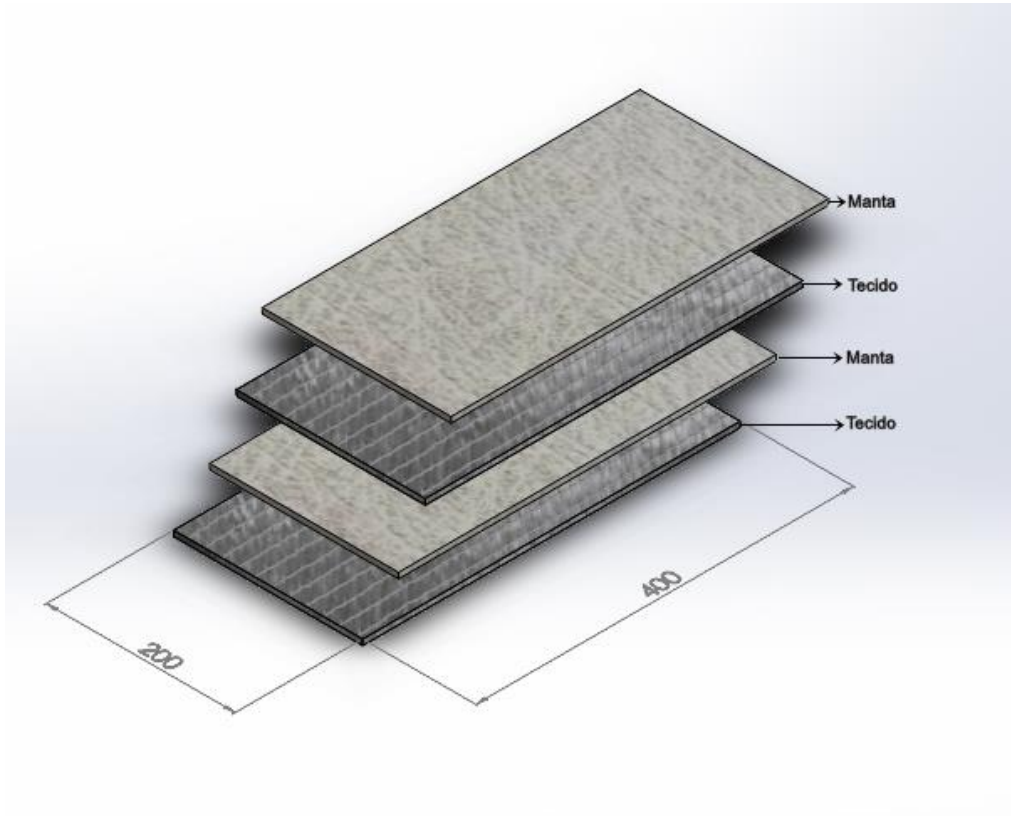


Fonte: O Autor (2019).



Após a preparação da superfície, deu-se continuidade ao procedimento de laminação igual ao anterior. Totalizando o perfil representado na Figura 26.

Figura 26 – Perfil tecido-manta-tecido-manta



Fonte: O Autor (2019).

Vinte e quatro horas depois, foi lixado a região da união com uma lixa grossa afim de prepara-la para das próximas laminações. E o procedimento da laminação anterior foi repetido para estas novas camadas, respeitando os intervalos de 12 horas entre laminação de tecido + manta e lixando as camadas (Figura 27). Assim obteve-se o perfil de dos corpos de prova com união de manta representado na Figura 18 e o resultado na Figura 28.

Figura 27 – Lixamento entre camadas de tecido e manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 28 – Perfil final da laminação com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

## 6.2. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM UNIÃO SEM MANTA

Em paralelo, foi realizada a laminação do perfil cuja união é sem manta. Desta vez, foi pesado duas camadas de tecido biax45 e uma manta (Figura 29).



Figura 29 – Pesagem do perfil tecido-manta-tecido

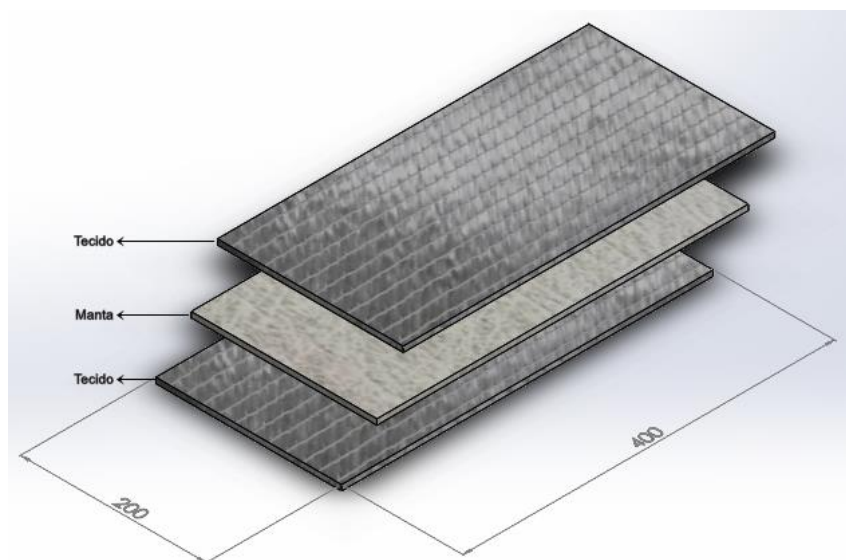


Fonte: O Autor (2019).

A proporção de resina em relação a fibra de vidro foi similar a anterior, mantendo a relação 80:20. Portanto, utilizou 428g de resina catalisada a 1%.

No perfil com união de tecido, a laminação ocorreu em duas etapas, sendo a primeira: laminação de tecido-manta-tecido (Figura 30 e 31), e depois de 24 horas, a segunda etapa com união tecido-manta-tecido (Figura 19) e o resultado final está na Figura 32.

Figura 30 – Perfil tecido-manta-tecido



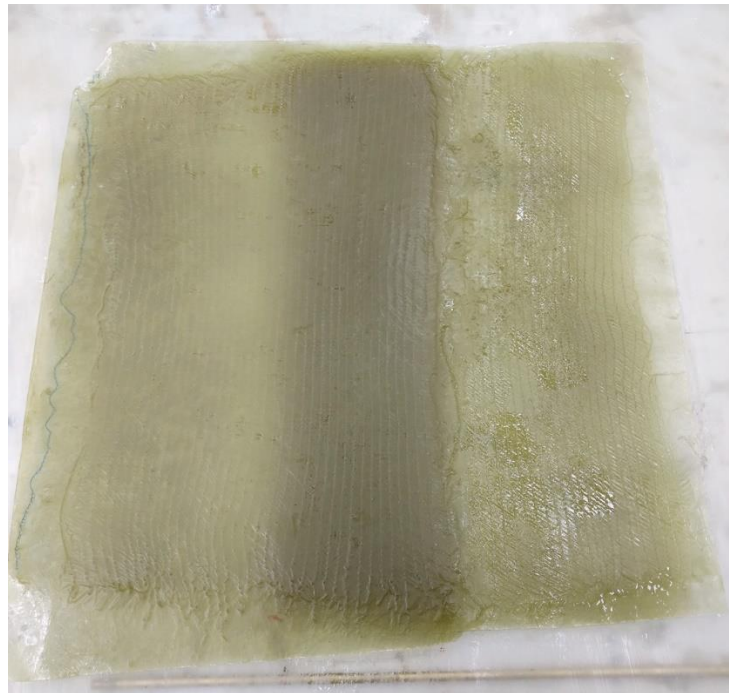
Fonte: O Autor (2019).

Figura 31 – Primeira etapa da laminação do perfil e preparação para a segunda etapa



Fonte: O Autor (2019).

Figura 32 - Perfil final da laminação com união de tecido



Fonte: O Autor (2019).

### 6.3. LAMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CONTÍNUO

Como forma de avaliar se os CPs com uniões (com e sem manta), quando submetidos a tração, de fato, romperam nas uniões interlaminares, decidiu-se elaborar CPs sem

descontinuidade nas laminações, de tal modo que sua ruptura ocorra de forma simples a tração das fibras de vidro e resina (compósito).

O processo de laminação dos corpos de provas contínuos com manta, foi análogo ao com união de manta, mantendo a relação de 80:20 para resina a fibra e 12 horas de espera entre laminações das camadas. Desta forma, obteve-se novamente o perfil de laminação da Figura 20 com secção transversal constante.

A laminação dos cps contínuos sem manta foi similar ao item 6.2 representado pela Figura 21 também com seção transversal constante.

## 6.5. RECORTE DOS CORPOS DE PROVA

Nesta seção será apresentado a norma ASTM D3039/D3039M referente as geometrias dimensionais dos corpos de provas e o processo de recorte dos mesmos.

### 6.5.1. Norma ASTM D3039/D3039M.26738

Devido a diferentes interesses em estudar materiais compostos com uma variada gama de abordagens, tornou-se difícil estabelecer uma geometria universal que seja útil para os corpos de prova. Logo, surge três requisitos a serem cumpridos: forma, dimensão e tolerâncias.

A Tabela 2 mostram estes requisitos e a Tabela 3 a sua complementar.

Tabela 2 – Requisitos dimensionais corpo de prova e tabs

<b>Tabela 2 - Requisitos de geometria para o corpo de prova sob tração</b>	
<b>Corpo de prova</b>	
Parametros:	Requisitos:
Forma	Secção transversal retangular constante
Comprimento mínimo	Garra+duas vezes a largura+Bitola
Largura	Como necessitado (Tabela 3)
Tolerância largura	+/- 1% da largura
Espessura	Como necessitado (Tabela 3)
Tolerância Espessura	+/- 4% da espessura
Achatamento (planicidade)	Plano com leve pressão do dedo
<b>Requisitos abas (se necessário):</b>	
Material aba	Como necessitado (Tabela 3)
Orientação das fibras (aba em compósito)	Como necessitado (Tabela 3)
Espessura	Como necessitado (Tabela 3)
Variação de espessura entre abas	+/- 1% da espessura

Ângulo de chanfro	5° à 90°
-------------------	----------

Fonte: ASTM D3039D3039M.26738 (2019).

Tabela 3 – Geometria recomendada para os corpos de prova

<b>Tabela 3 - Geometria recomendada para ensaio de tração</b>						
Orientação Fibra	Largura (mm)	Comprimento total (mm)	Espessura (mm)	Comprimento tab (mm)	Espessura tab (mm)	Ângulo chanfro tab
0° Unidirecional	12	250	1	56	1,5	7° à 90°
90° Unidirecional	25	175	2	25	1,5	90°
Balanceda e simétrica	25	250	2,5	Lixa de esmeril	-	-
Aleatória e descontínua	25	250	2,5	Lixa de esmeril	-	-

Fonte: ASTM D3039D3039M.26738 (2019).

Caso os modos de falha são aceitáveis e ocorrem com frequência, então não há razão para alterar o modo de garra.

Existem muitas configurações de materiais, tais como laminados multidirecionais, compostos de moldagem de chapas aleatoriamente reforçados, que podem ser testados com sucesso sem abas.

Mas as abas são altamente recomendadas em testes com compósitos laminados unidirecionalmente, cuja falha se dá na direção da fibra. As abas também podem ser necessárias para testar materiais unidirecionais na direção da matriz, evitando danos da garra.

### 6.5.2. O Recorte

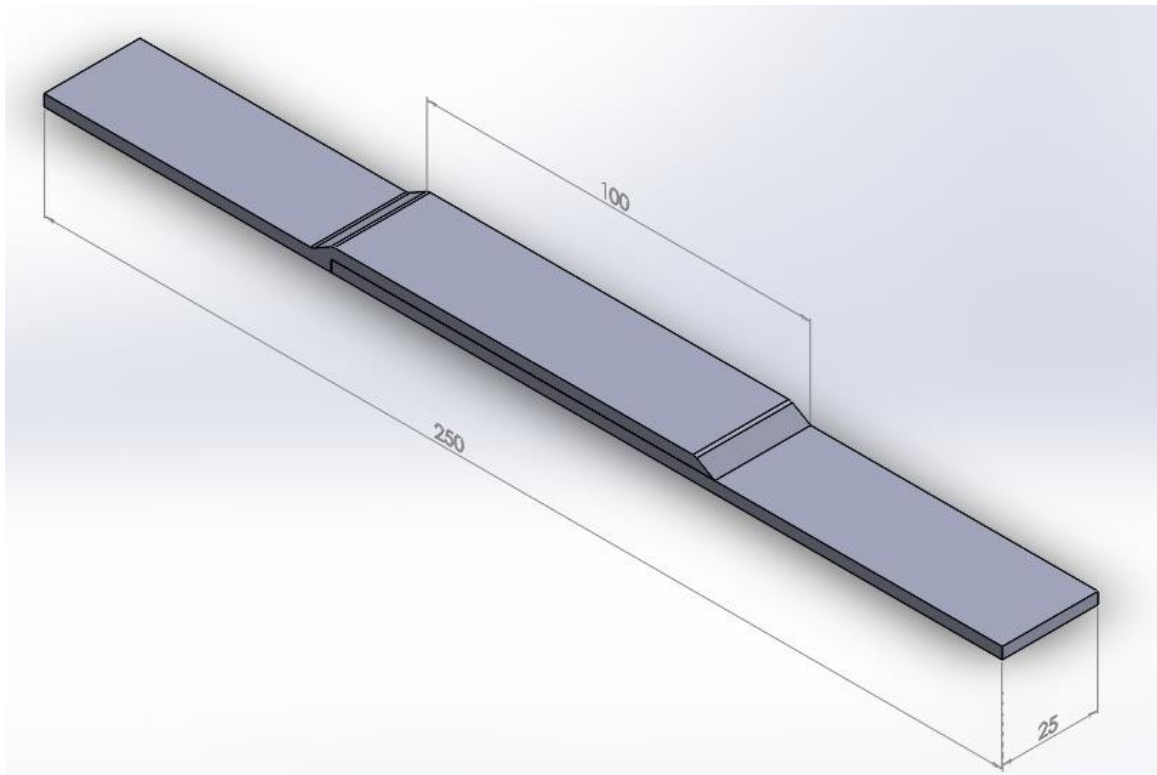
Antes de realizar os recortes, aguardou-se o processo de cura por uma semana conforme sugerido por Nasseh (2007) na seção 2.3.1, e então os perfis de laminação com união foram desmoldados e marcados com as dimensões da Figura 33, respeitando a norma ASTM da seção 6.5.1, desenvolvida para ensaio de tração em compósitos fibrados.

Fez-se uso de uma serra circular manual (Anexo G), onde Marinucci (2011) menciona que deve ser evitado disco de corte de aço rápido pelo fato do material ser extremamente

abrasivo, preferenciar utilizar discos diamantado industrial e recomenda usar velocidade periférica no disco na faixa de 30 a 50 m/s.

Seguindo estas recomendações, também foi usado uma canaleta de alumínio com largura de 25 mm foi utilizada como guia (Figura 34) para auxiliar nos recortes dos corpos de prova.

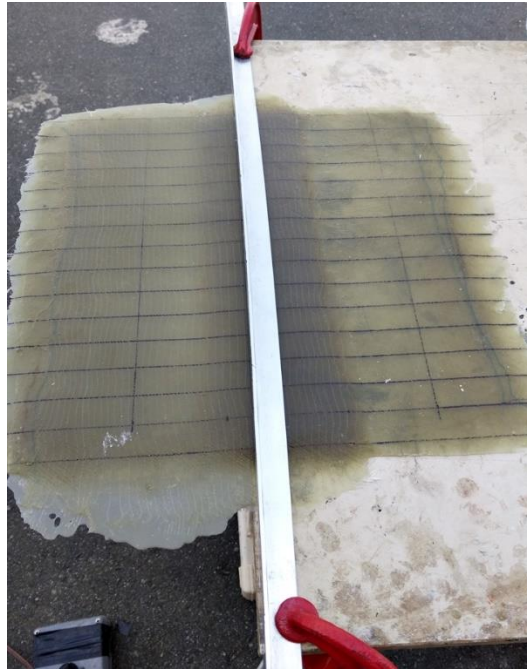
Figura 33 – Dimensões dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2019).



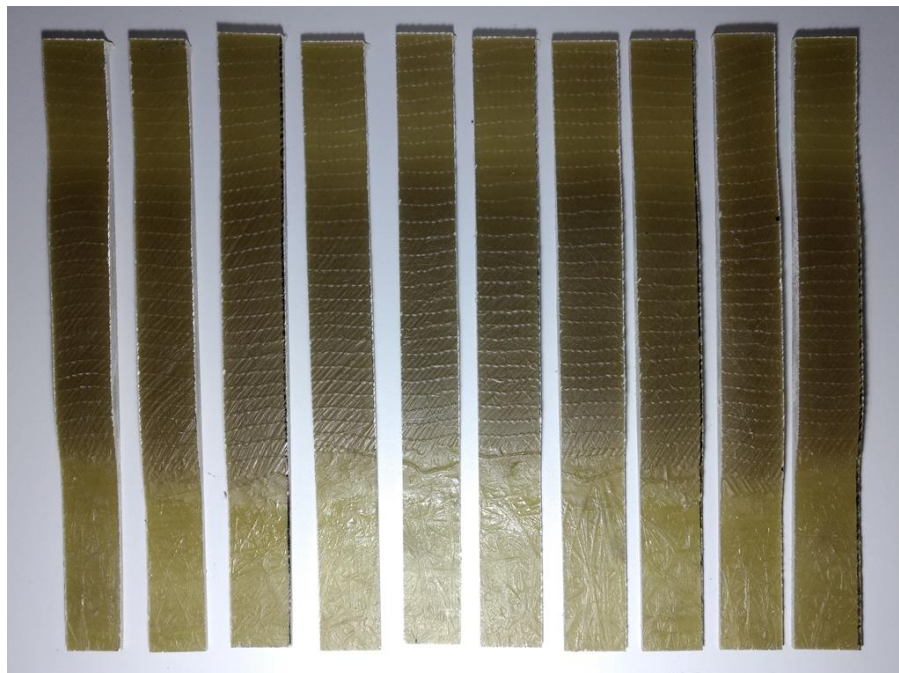
Figura 34 – Canaleta utilizada como guia para os recortes dos CP's



Fonte: O Autor (2019).

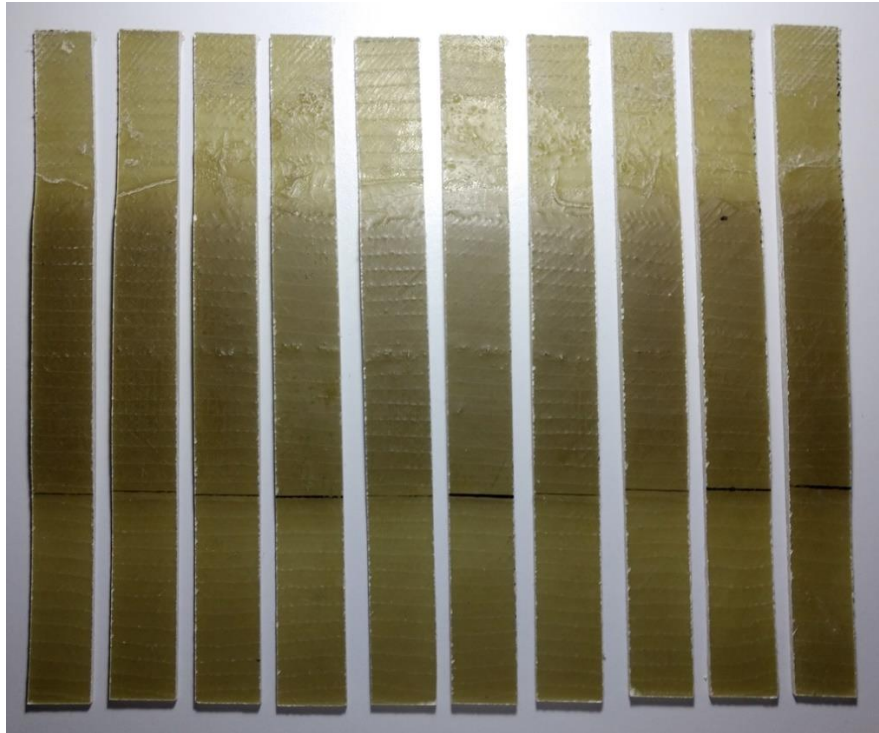
Desta forma, obtive-se os corpos de prova com as dimensões da Figura 33 para cada tipo de união (Figuras 35 e 36).

Figura 35 – Corpos de prova com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 36 – Corpos de prova com união sem manta



Fonte: O Autor (2019).

O recorte para os corpos de prova contínuo seguiu o mesmo procedimento dos cps com união.

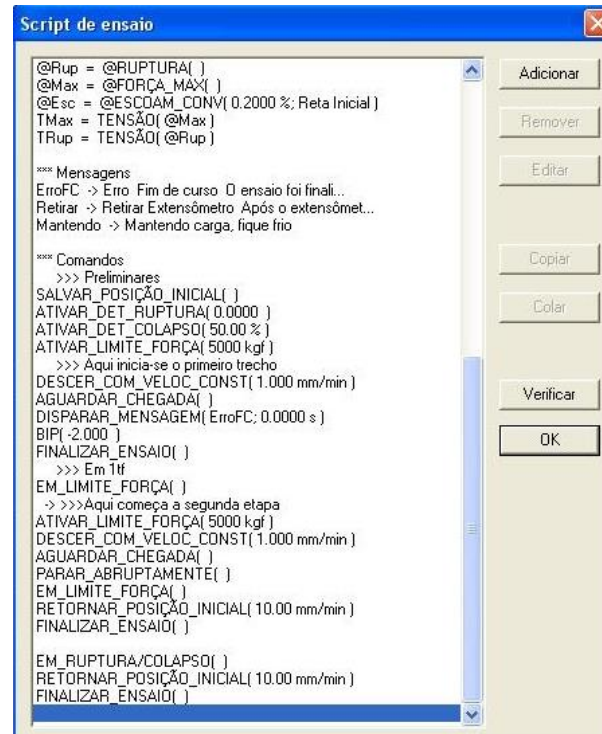
## 6.6. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado numa máquina Emic DL30000N, célula Trd29, extensômetro Trd10 e versão do programa Tesc Versão 1.13. E o método empregado no ensaio foi tração a velocidade constante com ruptura.

Foram ajustadas as seguintes configurações para todos os ensaios descritos neste trabalho (Figura 37):

- Carga máxima: 5000kgf;
- Velocidade constante das garras (superior e inferior): 1mm/min;
- Ativar detecção de colapso: 50%.

Figura 37 – Ajuste de configurações para todos os ensaios de tração



Fonte: O Autor (2019).

A posição dos corpos de provas nas garras foi ajustada para 40mm (Figura 38) conforme a norma ASTM 3039/3039M.

Figura 38 – Ajuste da posição dos corpos de prova nas garras



Fonte: O Autor (2019).

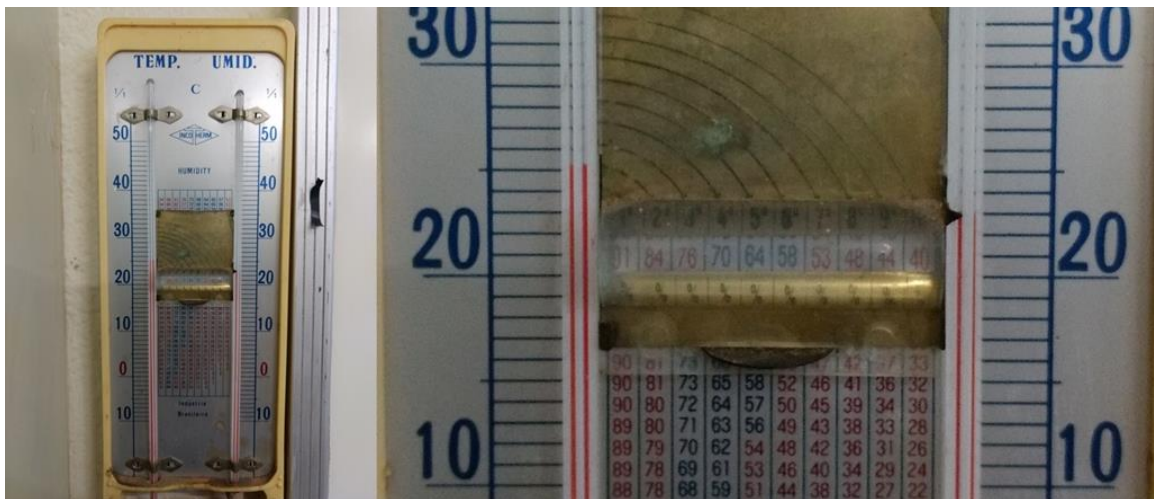


Estas configurações padrões de ensaio se repetiram para todos os corpos de prova ensaiados.

### 6.6.1. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova com União de Manta

Desta forma, solicitou-se todos os corpos de prova. Primeiramente foi ensaiado os CP's com união de manta a uma temperatura ambiente de 25°C e humidade relativa do ar de 84% (Figura 39).

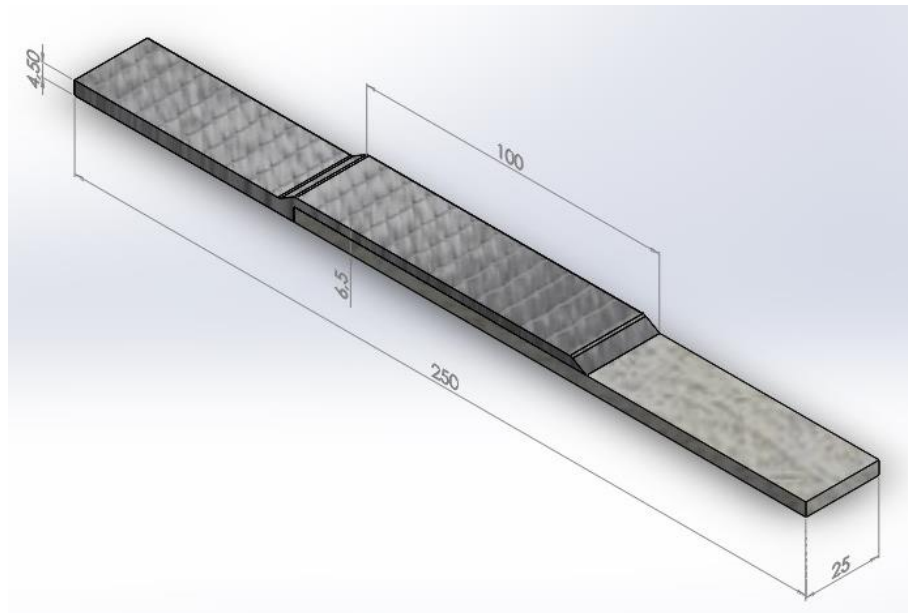
Figura 39 – Temperatura e humidade relativa do ar para os cps com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 40 representa a dimensão em milímetros dos corpos de provas ensaiados com união de manta.

Figura 40 – Perfil do corpo de prova com união de manta

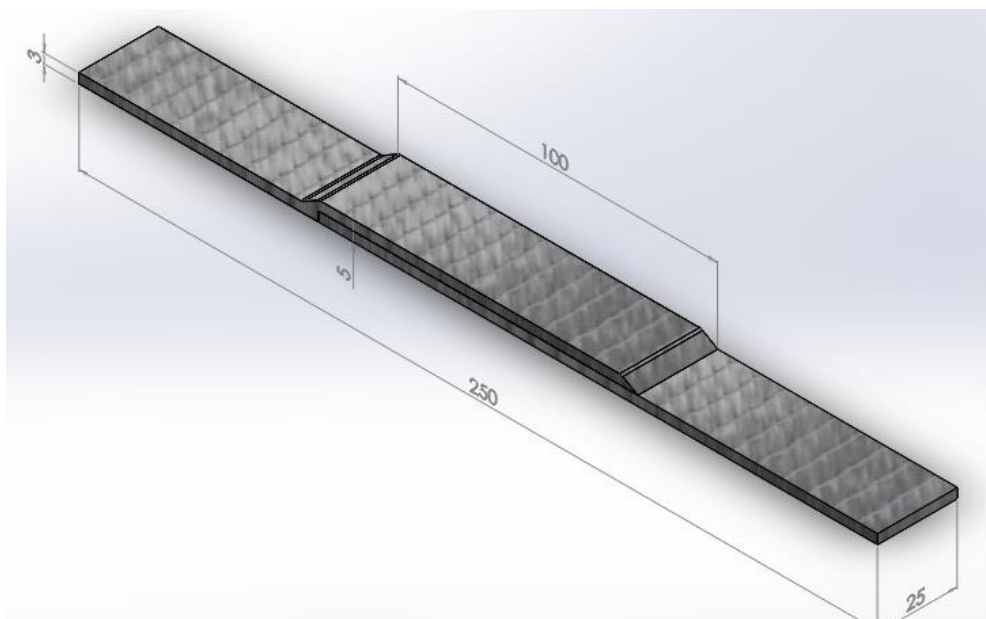


Fonte: O Autor (2019).

### 6.6.2. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova com União sem Manta

Este ensaio ocorreu análogo ao anterior, porém com uma pequena diferença na umidade relativa do ar de 84% para 83% e a temperatura se manteve 25°C. O perfil dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração está representado em milímetros na Figura 41.

Figura 41 – Perfil do corpo de prova com união sem manta



Fonte: O Autor (2019).

### 6.6.3. Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Contínuos

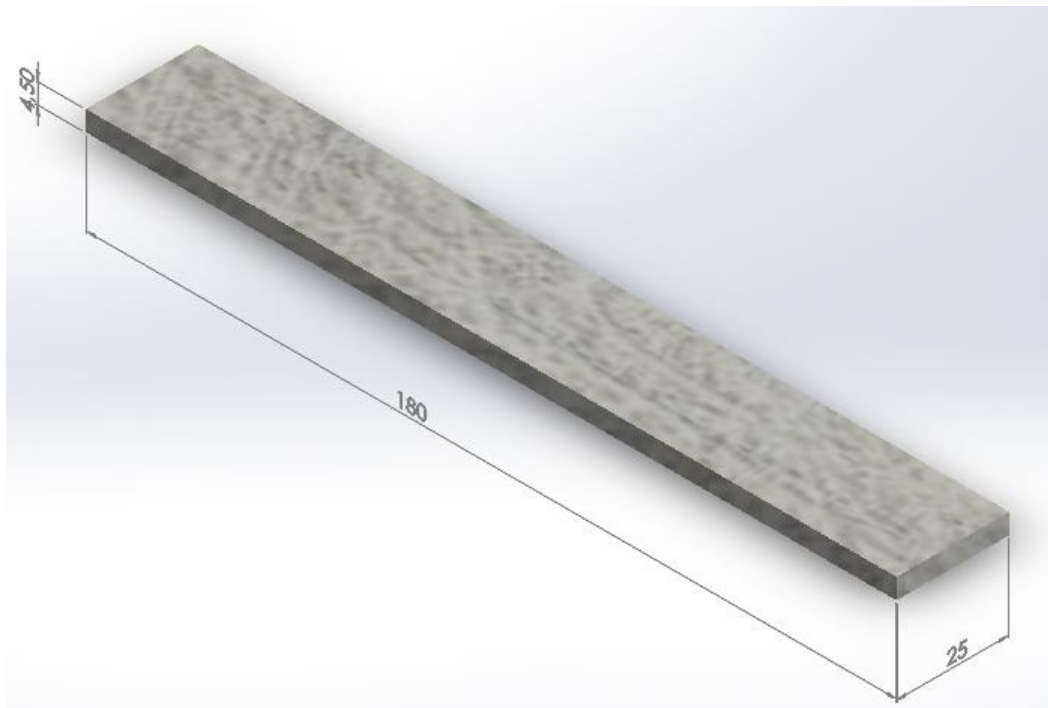
O ensaio dos corpos de prova contínuo ocorreu a uma temperatura ambiente de 23°C com humidade relativa do ar de 83%.

As Figuras 42 e 43 representam o perfil dos corpos de prova contínuos com manta e os corpos de prova contínuos sem mant, respectivamente.

Enfatiza-se que os corpos de prova sem união possuem seção transversal constante e que representam a porção contínua do laminado.

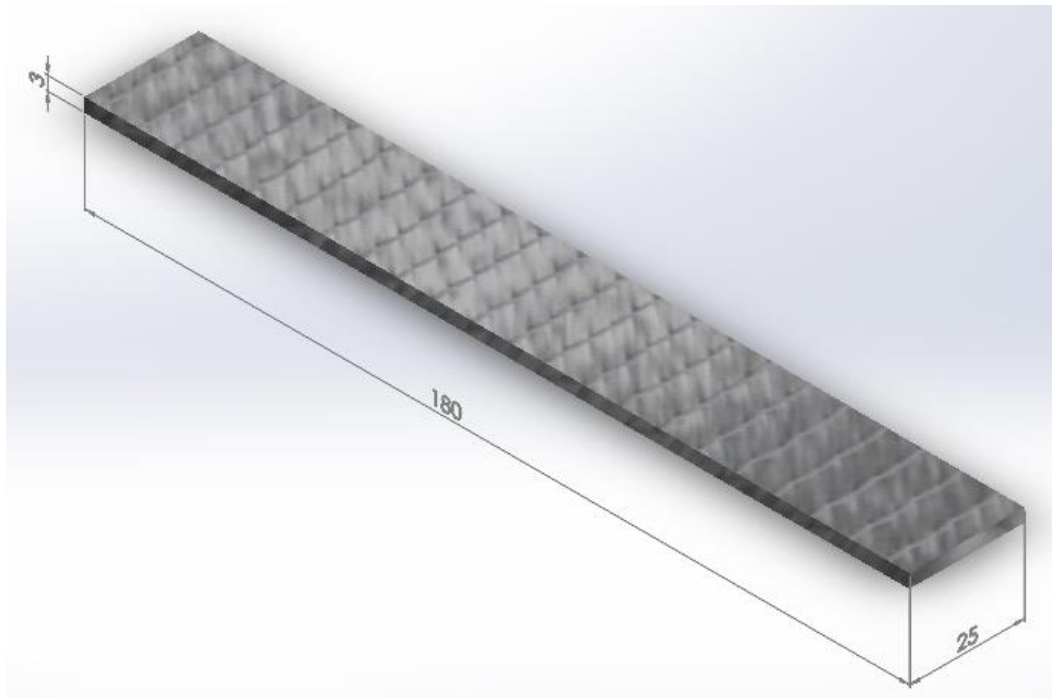
Os corpos de prova sem união têm a mesma seção transversal das regiões fora da união, porém seu comprimento é de 180mm ao invés de 250mm, uma vez que a porção do laminado sem união mede 180mm.

Figura 42 – Perfil do corpo de prova contínuo com manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 43 – Perfil do corpo de prova contínuo sem manta



Fonte: O Autor (2019).

## 7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresentará os resultados dos ensaios de tração para cada perfil de corpo de prova e a análise dos resultados será descrita no capítulo posterior.

### 7.1. RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO DE MANTA

Dez corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração, e o resultado encontra-se na Tabela 4. Onde a área é a multiplicação da largura pelo comprimento da união (25mm x 100 mm). Assim, tensão máxima cisalhante na união representa a divisão da força (kgf) pela área (mm).

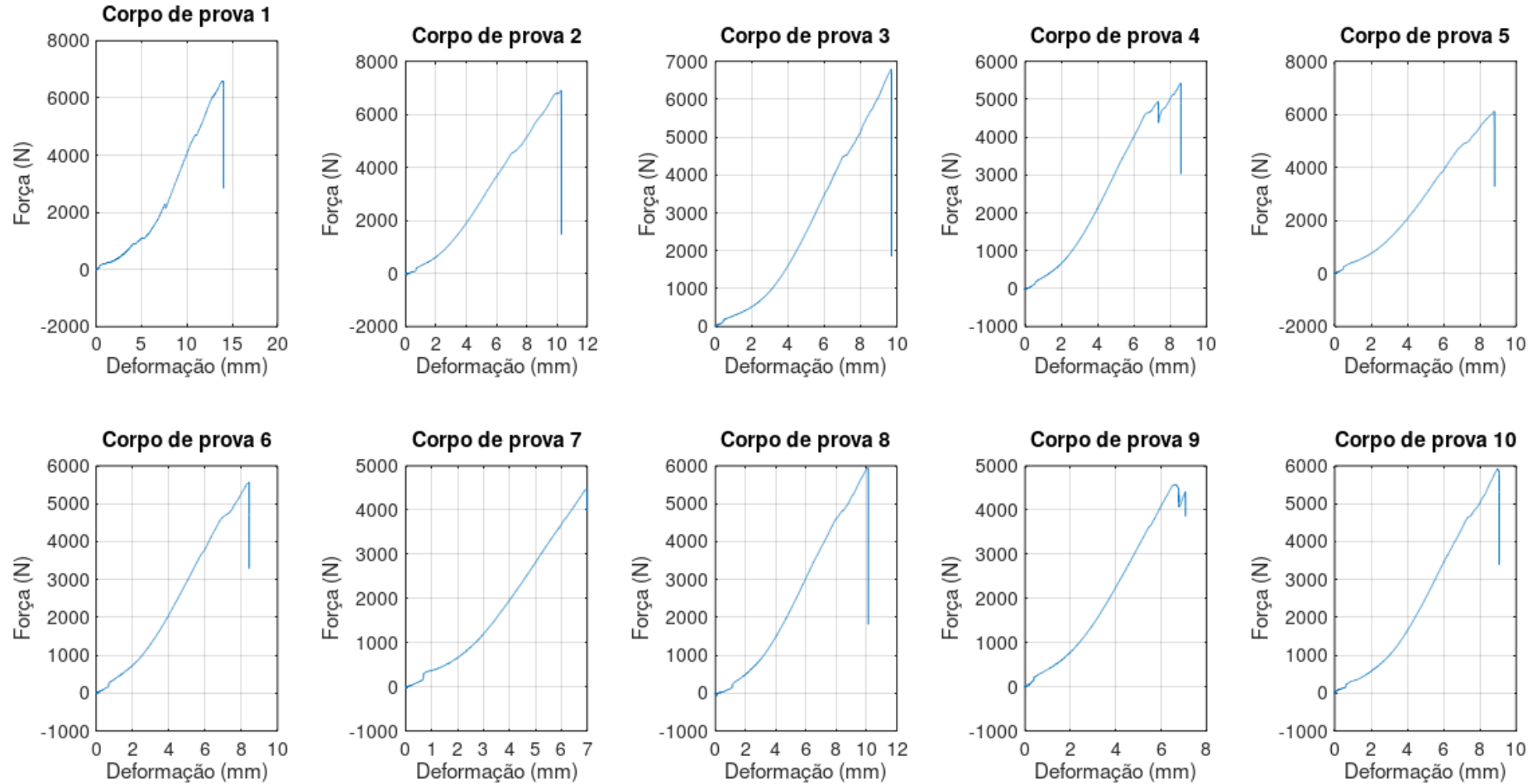
Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração dos CP's com união de manta

<b>Corpos de prova com união de manta</b>			<b>Dimensões</b>	
Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (MPa)	Largura (mm)	25
CP1	673,35	2,64	Comprimento (mm)	100
CP2	704,10	2,76	Área (mm <sup>2</sup> )	2500
CP3	692,82	2,72		
CP4	553,44	2,17		
CP5	625,15	2,45		
CP6	567,79	2,23		
CP7	456,07	1,79		
CP8	606,73	2,38		
CP9	467,35	1,83		
CP10	604,68	2,37		
<b>Média</b>	<b>595,15</b>	<b>2,34</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>86,16</b>	<b>0,34</b>		
<b>Variância</b>	<b>7423,79</b>	<b>0,11</b>		
<b>Coef. Var (%)</b>	<b>14,48</b>	<b>14,48</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>456,07</b>	<b>1,79</b>		
<b>Máximo</b>	<b>704,10</b>	<b>2,76</b>		

Fonte: O Autor (2019).

A Figura 44 está representado o resultado em forma gráfica ponto a ponto dos 10 corpos de provas com união de manta submetidos ao ensaio de tração a velocidade constante.

Figura 44 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

As características das falhas das amostras tiveram diferenças. Desta forma, as figuras 45 a 48 demonstram falhas existentes.

Figura 45 – Primeira característica de falha dos CP's com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 46 – Segunda característica de falha dos CP's com união de manta



Fonte: O Autor (2019).



Figura 47 – Terceira característica de falha dos CP's com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

Figura 48 – Quarta característica de falha dos CP's com união de manta



Fonte: O Autor (2019).

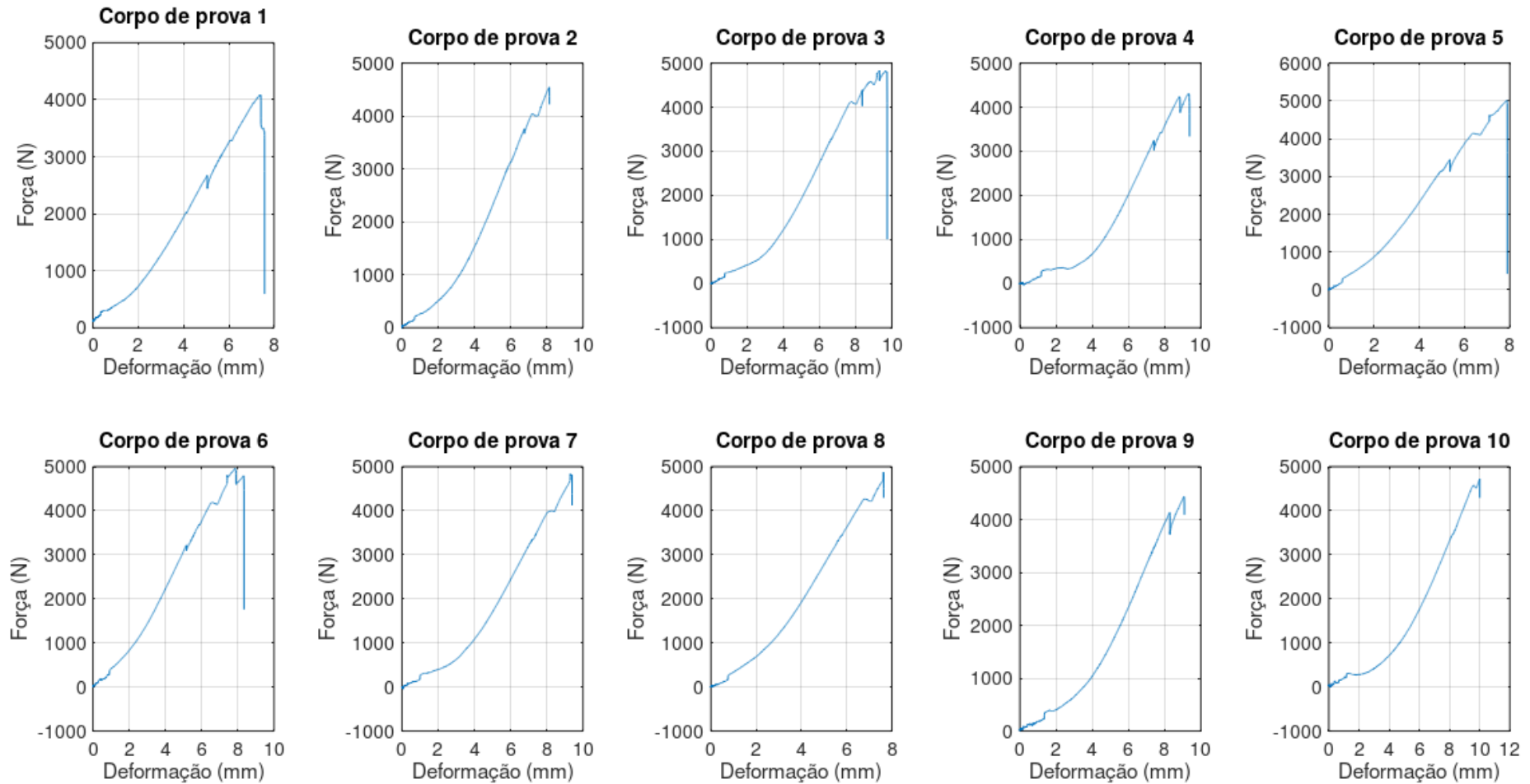
Demais Figuras estão no Apêndice E.

## 7.2. RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO SEM MANTA

Na figura 49 está representado em forma gráfica o resultado do ensaio.



Figura 49 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova com união sem manta



Fonte: O Autor (2019).

Na Tabela 5, está representado os resultados gráficos em forma de tabela considerando a área como a multiplicação da largura e comprimento da união (Figura 41), similar a seção anterior.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração dos CP's com união sem manta

<b>Corpos de prova com união de tecido</b>			<b>Dimensões</b>	
Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (MPa)	Largura (mm)	25
			Comprimento (mm)	100
CP1	416,10	1,63	Área (mm)	2500
CP2	463,25	1,82		
CP3	492,27	1,93		
CP4	439,68	1,73		
CP5	511,42	2,01		
CP6	506,29	1,99		
CP7	492,97	1,93		
CP8	497,07	1,95		
CP9	451,97	1,77		
CP10	481,70	1,89		
<b>Média</b>	<b>475,27</b>	<b>1,86</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>29,74</b>	<b>0,12</b>		
<b>Variância</b>	<b>982,56</b>	<b>0,02</b>		
<b>Coef. Var (%)</b>	<b>6,26</b>	<b>6,26</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>416,10</b>	<b>1,63</b>		
<b>Máxima</b>	<b>511,42</b>	<b>2,01</b>		

Fonte: O Autor (2019).

Diferente dos CP's com união de manta, para os com união sem manta, as características de rompimento dos corpos de prova foram semelhantes, sem variações aparentes. Assim, na Figura 50 e 51 estão os corpos de máxima e mínima resistência ao cisalhamento respectivamente. E demais Figuras no Apêndice F.

Figura 50 – Corpo de prova com máxima resistência ao cisalhamento



Fonte: O Autor (2019).

Figura 51 – Corpo de prova com mínima resistência ao cisalhamento

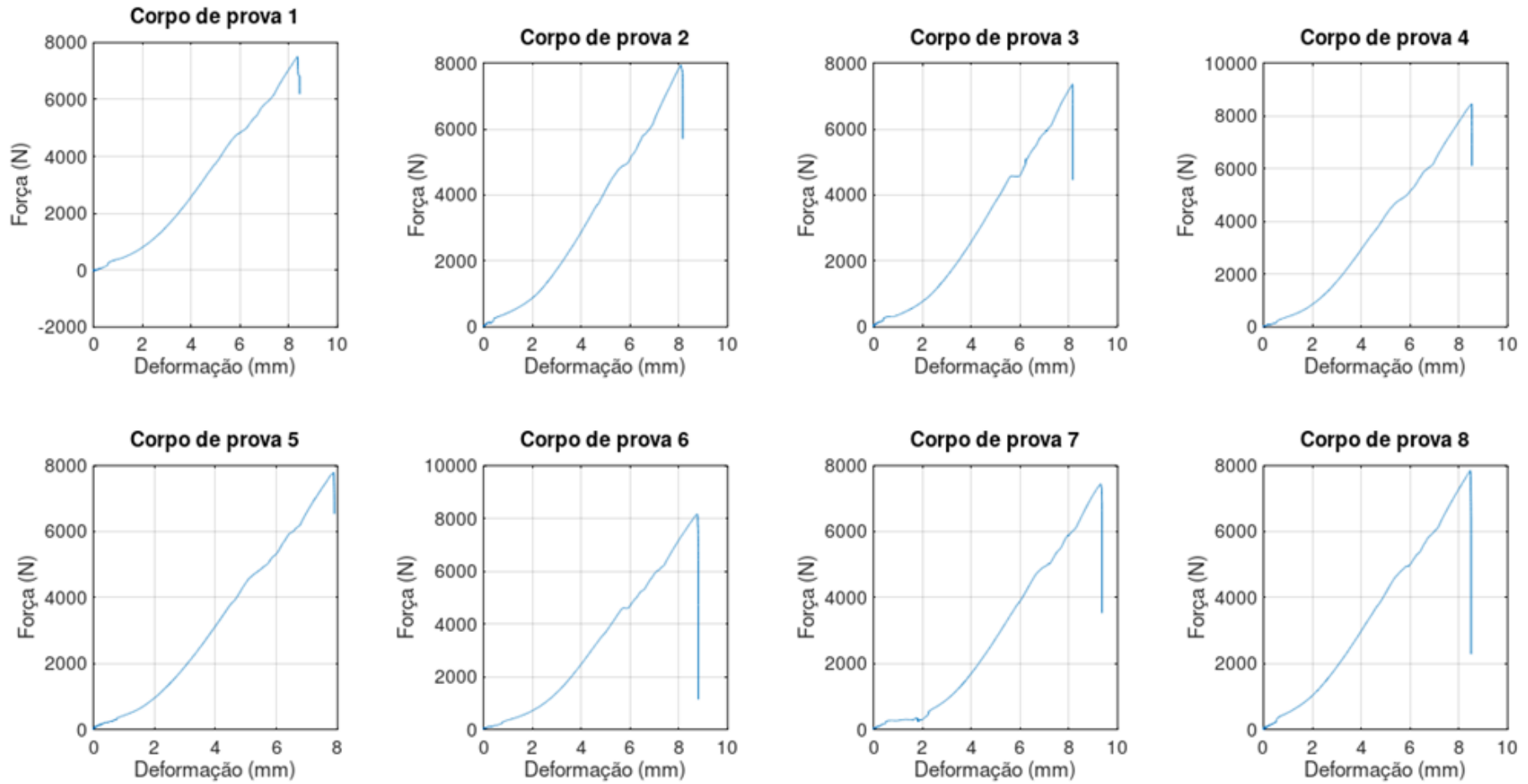


Fonte: O Autor (2019).

### 7.3. RESULTADOS DOS CPS CONTÍNUOS COM MANTA

Na figura 52, está representado de forma gráfica o resultado dos ensaios.

Figura 52 – Resultado do ensaio de tração dos corpos de contínuos com manta



Fonte: O Autor (2019).

A Tabela 6 está representando os resultados gráficos, sendo a área como uma multiplicação da espessura pela largura (4,5mm x 25mm), ou seja, é a área da seção transversal da Figura 42

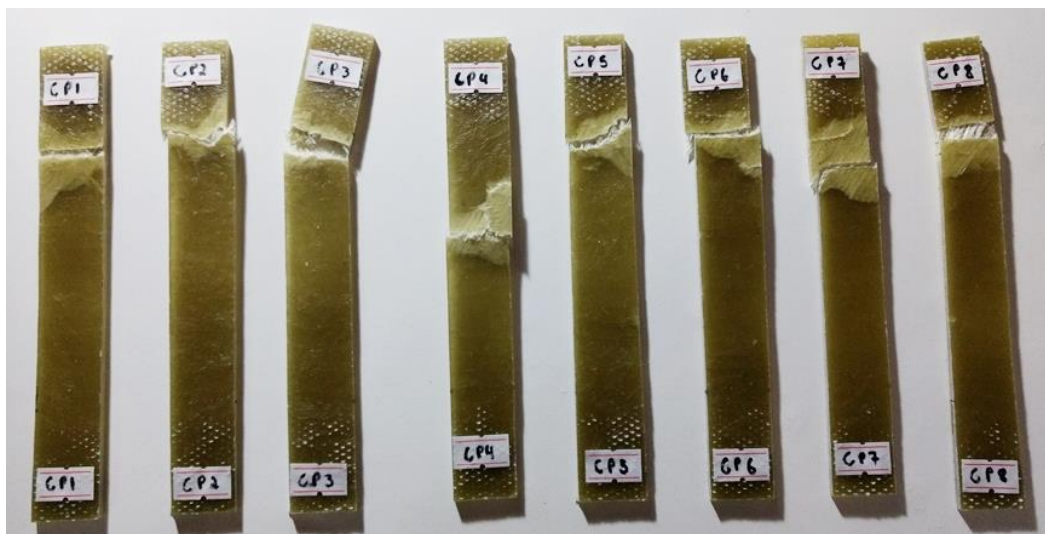
Tabela 6 – Resultado do ensaio de tração dos CPs contínuos com manta

Corpos de prova 2 tecido 2 CSM			Dimensões	
Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (MPa)	Largura (mm)	25
CP1	765,59	66,76	Espessura (mm)	4,5
CP2	809,66	70,60	Área (mm)	113
CP3	750,22	65,42		
CP4	861,93	75,16		
CP5	794,29	69,26		
CP6	832,21	72,57		
CP7	759,44	66,22		
CP8	800,43	69,80		
<b>Média</b>	<b>796,72</b>	<b>69,47</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>35,74</b>	<b>3,12</b>		
<b>Variância</b>	<b>1460,02</b>	<b>11,10</b>		
<b>Coef. Var (%)</b>	<b>4,49</b>	<b>4,49</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>750,22</b>	<b>65,42</b>		
<b>Máxima</b>	<b>861,93</b>	<b>75,16</b>		

Fonte: O Autor (2019).

O uso de abas não se fez necessários, pois o padrão de falhas e resultados são satisfatórios para comparações. Sendo assim, a Figura 53 representa os oito corpos de provas ensaiados.

Figura 53 – Resultados dos CPs ensaiados contínuos com manta



Fonte: O Autor (2019).

#### 7.4. RESULTADOS DOS CPS CONTÍNUOS SEM MANTA

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio e a Figura 54, respectivamente o gráfico.

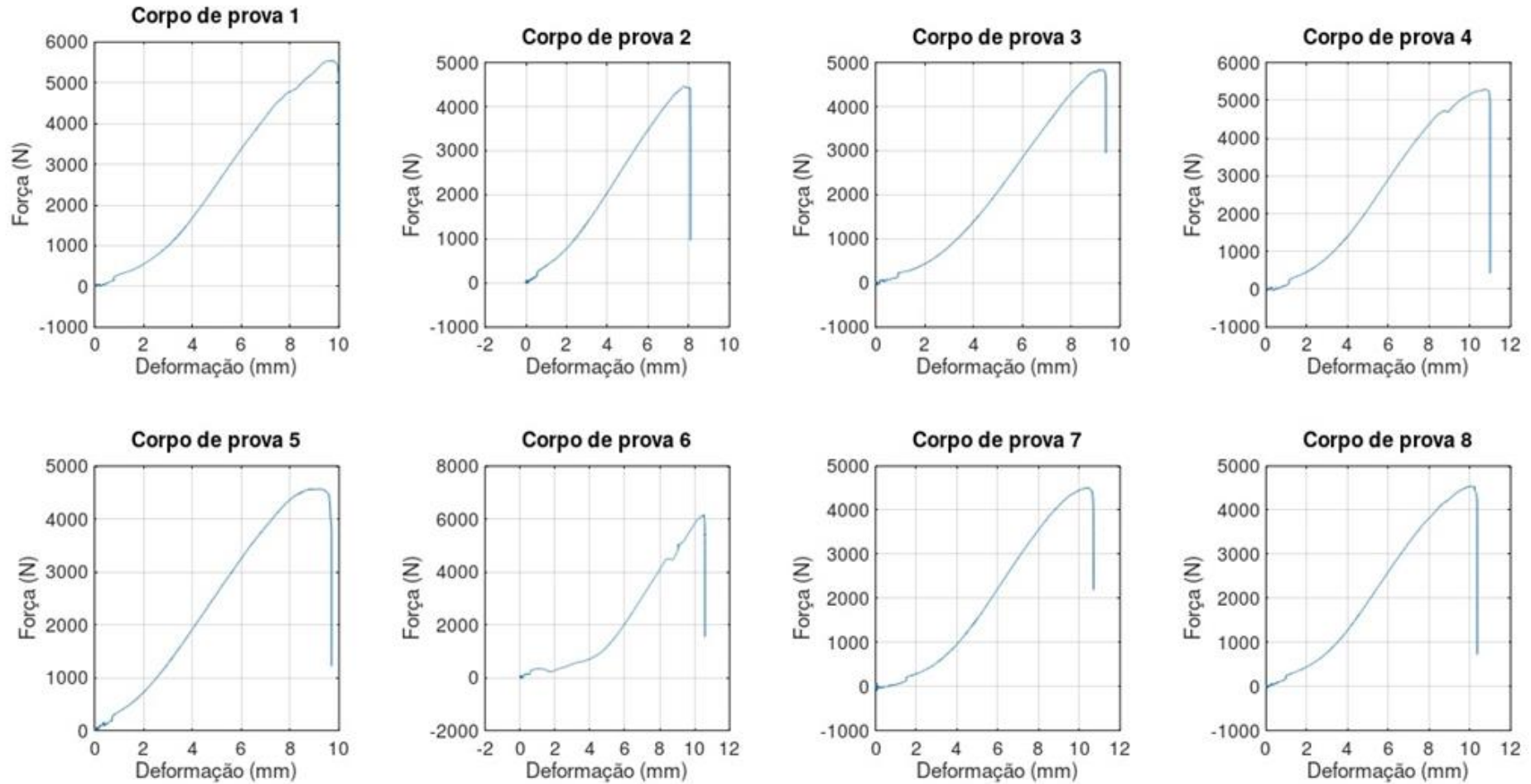
Tabela 7 – Resultado do ensaio de tração dos CPs contínuos sem manta

<b>Corpos de prova com 2 tecido 1 CSM</b>			<b>Dimensões</b>	
Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (MPa)	Largura (mm)	25
CP1	566,76	74,13	Espessura (mm)	3
CP2	455,05	59,52	Área (mm <sup>2</sup> )	75
CP3	493,99	64,61		
CP4	540,11	70,65		
CP5	466,32	60,99		
CP6	628,25	82,18		
CP7	460,17	60,19		
CP8	463,25	60,59		
<b>Média</b>	<b>509,24</b>	<b>66,61</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>63,20</b>	<b>8,27</b>		
<b>Variância</b>	<b>3994,15</b>	<b>68,33</b>		
<b>Coef. Var (%)</b>	<b>12,41</b>	<b>12,41</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>455,05</b>	<b>59,52</b>		
<b>Máximo</b>	<b>628,25</b>	<b>82,18</b>		

Fonte: O Autor (2019).

De forma similar a seção anterior, a tensão máxima é definida pela razão entre a força máxima pela área da seção transversal do corpo de prova da Figura 43.

Figura 54 - Resultado do ensaio de tração dos corpos de prova contínuos sem manta

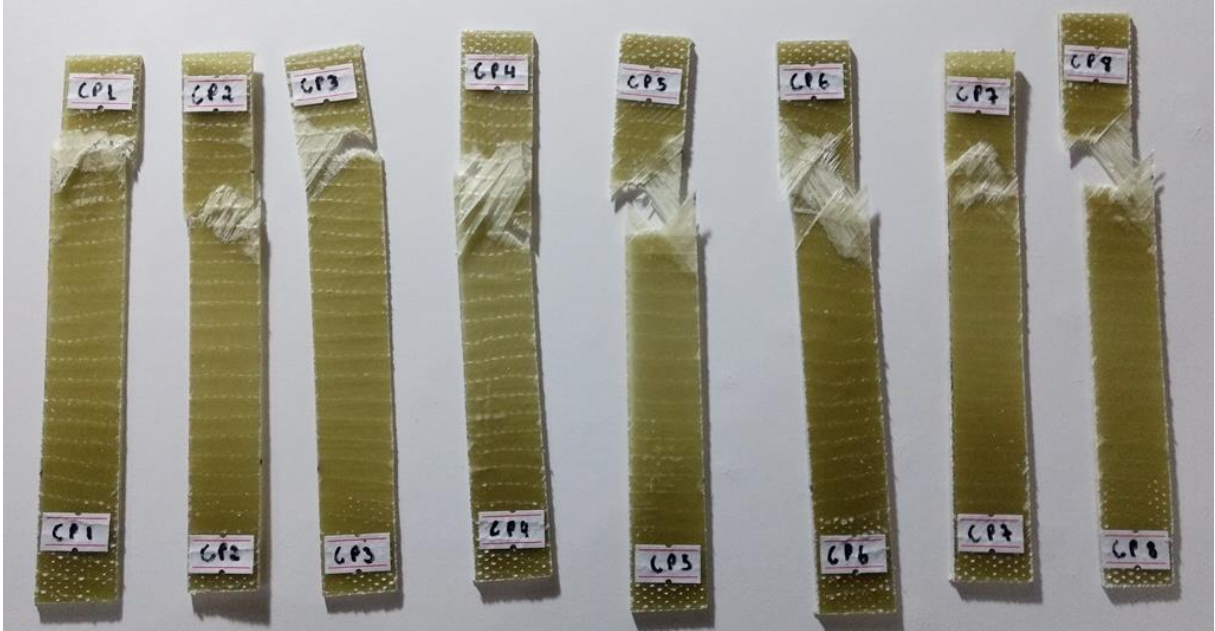


Fonte: O Autor (2019).



Na figura 55, encontra-se os corpos de prova após o ensaio.

Figura 55 – Resultados dos cps ensaiados contínuos sem manta



Fonte: O Autor (2019).



## 8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será realizado testes estatísticos para verificar se há evidências de diferenças entre os resultados das amostras apresentadas.

Também será discutido os resultados apresentados no capítulo anterior, onde o embasamento dos argumentos será através da fundamentação teórica.

### 8.1. TESTES ESTATÍSTICOS

As variâncias dos resultados obtidos nos ensaios serão comparadas através do Teste F, caso forem diferentes, a análise seguinte será feita pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

#### 8.1.1. Teste F para Duas Variâncias

O teste F é utilizado para comparar a variância de duas populações supostamente com distribuições normais (BARBETTA; BORNIA; REIS, 2009).

Formulando as hipóteses por:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ e } H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Onde:

$\sigma_1^2$ : variância da população 1; e

$\sigma_2^2$ : variância da população 2

A estatística do teste é calculada por:

$$f = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Onde:

$S_1^2$ : variância da amostra de  $n_1$  elementos; e

$S_2^2$ : variância da amostra de  $n_2$  elementos, considerando  $S_1^2 > S_2^2$ , ou seja, a maior variância deve ser colocada no numerador (BARBETTA et al., 2009, p. 247).

A distribuição de referência para este teste é a distribuição F com  $gl = n_1 - 1$  no numerador e  $gl = n_2 - 1$  no denominador (BARBETTA et al., 2009). No Anexo H está a tabela de distribuição F para nível de significância de 2,5% ( $p=0,025$ ).

Utilizando o teste bilateral (dividir significância por 2) com nível de significância de 5%, a seguir será apresentada as comparações das variâncias onde se  $f < f_c$ , então aceita  $H_0$  ou se  $f \geq f_c$ , então rejeita  $H_0$ . Esta é a regra de decisão na abordagem clássica (BARBETA et al., 2009).

Comparação da variância entre união com manta e união sem manta:

$$f = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{7423,79}{982,56} = 7,56$$

Para obter o valor crítico  $f_c$  ao nível de significância de 5%, deve-se obter área igual a 2,5% na cauda superior da distribuição F com gl = 9 no numerador e gl = 9 no denominador, o que acarreta  $f_c = 4,03$ . Como  $f \geq f_c$ , o teste rejeita  $H_0$ , logo a comparação de variância entre CPs com união de manta e união sem manta são diferentes com 95% de chance de a afirmação estar correta.

### 8.1.2. Teste Não Paramétrico de Mann-Whitney

Devido as amostras serem possuírem variâncias distintas, o teste não paramétrico de Mann-Whitney possibilita realizar a comparação entre as medianas das amostras (BARBETA et al., 2009). Afim de avaliar se os resultados apresentam evidências estatísticas que a presença da manta influência de forma significativa a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito.

Neste teste as hipóteses podem ser colocadas como:

$$H_0: n_1 = n_2 \text{ e } H_1: n_1 \neq n_2$$

Sendo que na abordagem unilateral a hipótese alternativa é  $H_1': n_1 > n_2$  ou  $H_1'': n_1 < n_2$ , dependendo do que se quer provar (BARBETA et al., 2009).

Sejam  $n_1$  e  $n_2$  os tamanhos das amostras 1 e 2.

Chama-se de  $W_1$  a soma dos postos da amostra 1 e  $W_2$  a soma dos postos da amostra 2. Ambas são complementares e deve-se utilizar na equação seguinte o maior valor (BARBETA et al., 2009).

$$U = W_1 - \left[ \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} \right] \quad (1)$$

Sob  $H_0$ , a estatística U tem as seguintes características:

$$E(U) = \frac{n_1 n_2}{2} \quad (2)$$

$$V(U) = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (3)$$

Assim, se  $H_0$  for verdadeira, observadas amostras independentes das duas populações, o valor calculado  $U$ , que chamado de  $u$ , não deve ser distante da grandeza analisada. Se for verificado  $u$  distante do valor esperado por  $H_0$  há indícios para rejeitar  $H_0$  (considerando a hipótese alternativa e o nível de significância) (BARBETA et al., 2009).

#### 8.1.2.1. Comparação entre CPs com União de Manta e União sem Manta

Realizando a comparação dos resultados dos corpos de prova com união de manta e com união sem manta:

As hipóteses são:

$H_0$ : a resistência ao cisalhamento interlaminar na união são iguais.

$H_1$ : a resistência ao cisalhamento interlaminar da união com manta é maior que a união sem manta.

Regra da decisão:

Se  $u \geq u_c$ , então rejeita  $H_0$

A Tabela 8 demonstra os cálculos obtidos. Onde foi ordenado os resultados em ordem crescente e  $W_1$  representa a soma dos postos do grupo 1 (união com manta).

No Apêndice I encontram-se a tabela Whitney para  $n_1 = 10$  e  $n_2 = 10$

Tabela 8 – Comparação entre CPs com União de Manta e União sem Manta

Grupo	Resistência (kgf)	Posto	W1=	142
2	416,10	1	U=	<b>87</b>
2	439,68	2	E(U)=	50
2	451,97	3	V(U)	13,23
1	456,07	4		
2	463,25	5	n1=	10
1	467,35	6	n2=	10
2	481,70	7		
2	492,27	8		
2	492,97	9		
2	497,07	10		
2	506,29	11		
2	511,42	12		
1	553,44	13		
1	567,79	14		
1	604,68	15		
1	606,73	16		
1	625,15	17		
1	673,35	18		
1	692,82	19		
1	704,10	20		

Fonte: O Autor (2019).

Com nível de significância de 0,5%  $u_c = 83$  (Anexo I), sendo  $u = 87$ , logo  $u \geq u_c$ , rejeita  $H_0$ . Portanto, com uma probabilidade de 99,5% de estar correto, a resistência ao cisalhamento interlaminar da união com manta é superior à união sem manta.

#### 8.1.2.2. Comparação entre CPs com União de Manta e Contínuos com Manta

De forma análoga a seção anterior, porém desta vez, as hipóteses são:

$H_0$ : a resistência ao cisalhamento interlaminar na união e a resistência a tração simples são iguais

$H_1$ : a resistência a tração simples dos CPs contínuos é maior que a resistência ao cisalhamento na união.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos. Onde Grupo 1 são contínuos com manta e Grupo 2 são união com manta.

Tabela 9 - Comparação entre CPs com União de Manta e Contínuos com Manta

<b>Grupo</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Posto</b>	<b>W1=</b>	<b>116,00</b>
2	1,79	1,00	<b>U=</b>	<b>80</b>
2	1,83	2,00	E(U)=	40
2	2,17	3,00	V(U)=	11,25
2	2,23	4,00		
2	2,37	5,00	n1=	8
2	2,38	6,00	n2=	10
2	2,45	7,00		
2	2,64	8,00		
2	2,72	9,00		
2	2,76	10,00		
1	65,42	11,00		
1	66,22	12,00		
1	66,76	13,00		
1	69,26	14,00		
1	69,80	15,00		
1	70,60	16,00		
1	72,57	17,00		
1	75,16	18,00		

Fonte: O Autor (2019).

Para um nível de 0,1%,  $u_c = 73$ , como  $u = 80$  e  $u \geq u_c$ , logo, com probabilidade de erro menor que 0,1%, a resistência a tração simples é maior que a resistência ao cisalhamento da união.

### 8.1.2.3. Comparação entre CPs com União sem Manta com Contínuos sem Manta

As hipóteses são:

$H_0$ : a resistência ao cisalhamento interlaminar na união sem manta e a resistência a tração simples são iguais

$H_1$ : a resistência a tração simples dos CPs contínuos sem manta é maior que a resistência ao cisalhamento na união sem manta.

O grupo 1 trata-se dos CPs contínuos e o Grupo 2 os CPs com união.

A Tabela 10 mostra os resultados.

Tabela 10 - Comparação entre CPs com União sem Manta com Contínuos sem Manta

<b>Grupo</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Posto</b>	<b>W1=</b>	<b>116,00</b>
2	1,63	1,00	<b>U=</b>	<b>80,00</b>
2	1,73	2,00	E(U)=	40
2	1,77	3,00	V(U)=	11,25
2	1,82	4,00		
2	1,89	5,00	n1=	8
2	1,93	6,00	n2=	10
2	1,93	7,00		
2	1,95	8,00		
2	1,99	9,00		
2	2,01	10,00		
1	59,52	11,00		
1	60,19	12,00		
1	60,59	13,00		
1	60,99	14,00		
1	64,61	15,00		
1	70,65	16,00		
1	74,13	17,00		
1	82,18	18,00		

Fonte: O Autor (2019).

Como esperado, o resultado foi análogo a seção anterior, logo com probabilidade de erro menor que 0,1%, as resistências a tração simples dos CPs contínuos sem manta são maiores que a resistência ao cisalhamento interlaminar dos CPs com união sem manta.

#### 8.1.2.4. Comparação entre CPs Contínuos com Manta e Contínuos sem Manta

Hipóteses:

$H_0$ : as resistências a tração simples dos CPs contínuos são iguais.

$H_1$ : as resistências a tração simples dos CPs contínuos são diferentes

O Grupo 1 são os contínuos com manta e o Grupo 2 os contínuos se manta.

Para realizar essa comparação, será abordado o teste bilateral com nível de significância de 5%. Pois, neste caso, não se há evidência da diferença entre as resistências dos CPs.

O resultado está na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação entre CPs Contínuos com Manta e Contínuos sem Manta

Grupo	Resistência (MPa)	Posto	W1=	78,50
2	59,52	1,00	U=	<b>42,50</b>
2	60,19	2,00	E(U)=	32
2	60,59	3,00	V(U)=	9,52
2	60,99	4,00		
2	64,61	5,00	n1=	8
1	65,42	6,00	n2=	8
1	66,22	7,00		
1	66,76	8,00		
1	69,26	9,00		
1	69,80	10,00		
1	70,60	11,50		
2	70,65	11,50		
1	72,57	12,50		
2	74,13	13,50		
1	75,16	14,50		
2	82,18	15,50		

Fonte: O Autor (2019).

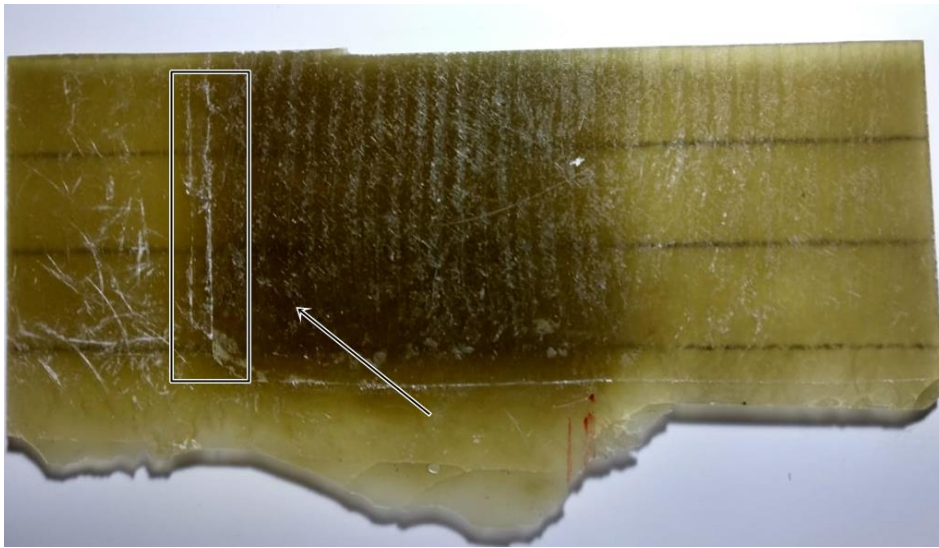
Com nível de significância de 5%,  $u_c = 50$ , sendo  $u = 42,50$ , logo,  $u < u_c$ . Ou seja, aceita  $H_0$ , logo não há evidências estatísticas que comprovem a diferença entre os laminados contínuos.

## 8.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO DE MANTA

Na Tabela 4, podemos observar a média da força máxima cisalhante resistida de 595,15 kgf com 14,48% de coeficiente de variância. Este elevado coeficiente de variância pode ser explicado com base no item 2.1.1.1, cuja a manta de fibra de vidro utilizada, desenvolve características quase-isotrópicas, porém a aleatoriedade das fibras e suas descontinuidades podem fazer com que o laminado assumira caráter não-homogêneo, resultando em tensões não lineares ao longo do compósito. Logo, diferentes padrões de falhas foram observados neste ensaio (Figuras 45 a 48 e Apêndice E).

Outro ponto relevante para a análise das falhas, é uma possível concentração de tensão devido ao processo de fabricação da sobreposição das camadas (Figura 56) e Apêndice G.

Figura 56 – Ponto de possível concentração de tensão da sobreposição na superfície em contato com o molde

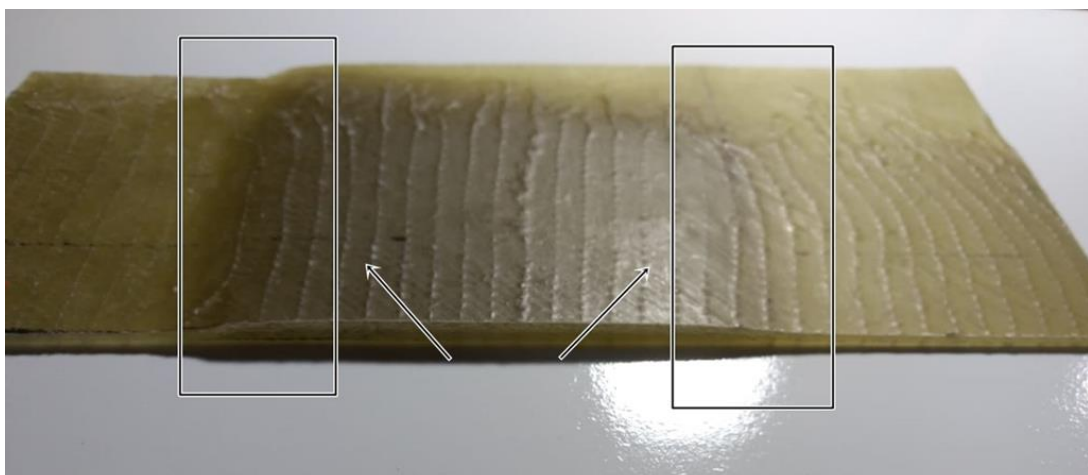


Fonte: O Autor (2019).

Esta concentração de tensão surge quando é feita uma sobreposição simples de camada, como foi realizado durante o processo de laminação da união descrito na seção 6.2.

Desta forma, a superfície inferior em contato com o molde marca a sobreposição de camadas, porém este fenômeno não ocorre na superfície superior, porque durante a técnica utilizada a resina é espalhada para as extremidades do laminado, facilitando a retirada do excesso de matriz e bolhas de ar aprisionadas no compósito. Com esse movimento, pouco de resina e fibra preenche a descontinuidade superior da união aliviando a concentração de tensão, pois cria-se uma “rampa” suavizando a sobreposição (Figura 57).

Figura 57 – Exemplo de eliminação da possível concentração de tensão



Fonte: O Autor (2019).



Porém, os resultados indicam que a concentração de tensão não induziu a falha. Uma vez que se manteve a aleatoriedade da localização da fratura.

Uma atenção especial deve ser dada ao corpo de prova 2 representado na Figura 46, pois visualmente percebemos a falha por cisalhamento interlaminar, descrito na seção 4.1.2, onde ocorreu uma delaminação de  $45^\circ$  entre as camadas. Este corpo de prova obteve a união com a maior resistência ao cisalhamento entre as amostras (704,10kgf) descrito na Tabela 4. E na Figura 44 podemos observar uma deformação de aproximadamente 10mm para o mesmo. Vale salientar que esta deformação tem uma certa imprecisão devido a possíveis folgas na máquina. Todavia, as baixas deformações na ruptura conferem o fato típico de um material frágil.

O ângulo de 45 graus observado no CP 2 é característico de fraturas por cisalhamento interlaminar, em geral associado a maiores valores de resistência se comparado a fraturas  $0^\circ$  (direção transversal do CP).

Também vale dar importância ao gráfico do corpo de prova 4 representando na Figura 44, que mesmo não tendo a maior resistência de cisalhamento interlaminar, percebemos mudança de inclinação da reta do gráfico entre 6mm a 8mm de deformação. A base para criar uma hipótese do ocorrido pode ser a seção 4.2. e a Figura 14 que demonstram duas características de comportamento para o compósito submetido ao esforço de tração longitudinal. A primeira quando o compósito rompe antes da matriz e a segunda quando a matriz rompe antes do compósito. O CP 4 dá indícios que melhor se enquadra no primeiro comportamento (Figura 14a), uma vez que, as fibras de vidro iniciaram seu processo de ruptura em 6mm e a matriz continuou a transferir tensão para as fibras curtas restantes até aproximadamente 8mm, onde ocorreu o colapso.

Sendo assim, diante das observações, podemos concluir que os corpos de prova com união de manta produziram resultados coerentes com a fundamentação teórica, a manta possui propriedades quase-isotrópicas, ou seja, exibe comportamento de resistir tensões em quase todas as direções, porém o fato de ser fibras descontínuas e aleatórias, também pode induzir a produção de falhas aleatórias, como pôde ser visto no Apêndice A. Mas ambas características de falhas concentraram-se na região da união, assim, validando a teoria do item 4.3. Dizendo que a produção de tensões não lineares provoca tensões de arrancamento nas extremidades das sobreposições.

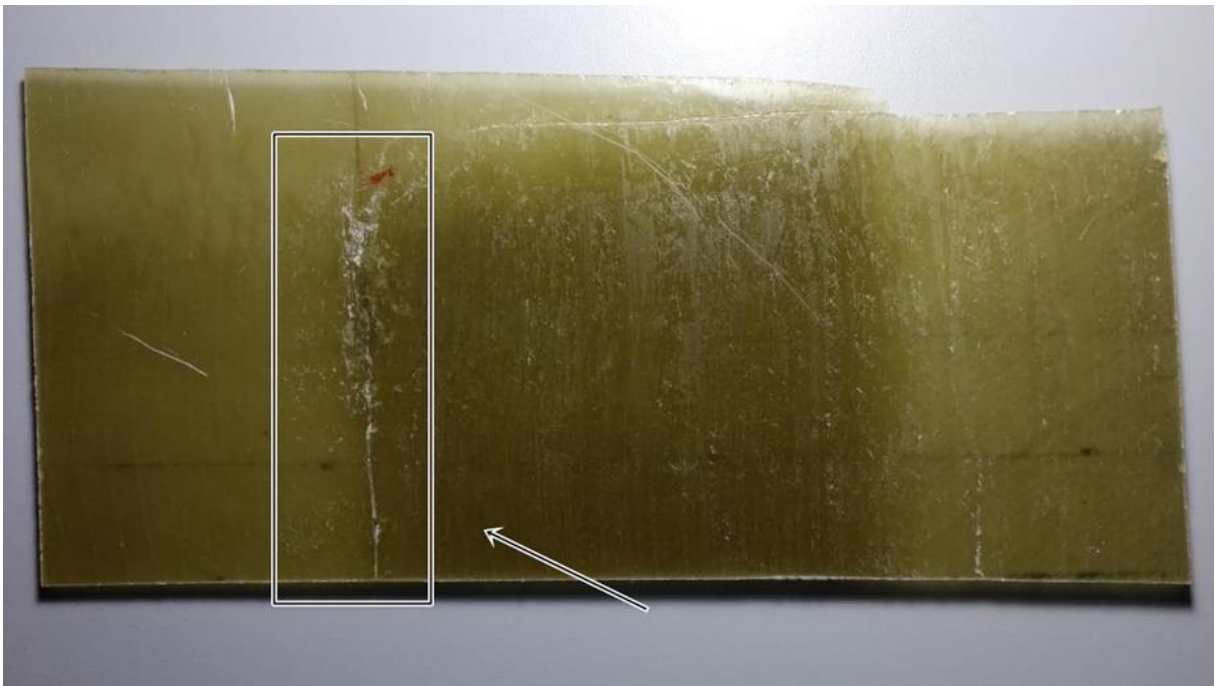
### 8.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CPS COM UNIÃO SEM MANTA

Diferente das mantas, os tecidos de fibra de vidro são caracterizados por possuírem fibras contínuas e alinhadas, logo, num composto, exibem propriedades físicas comportamentais que se diferenciam da manta. Este fenômeno pôde ser visto nos corpos de prova ensaiados com união sem manta representado nas Figuras 50 e 51, onde as diversidades das falhas foram inferiores à união com manta.

Notam-se no Apêndice F que as tensões de arrancamento se repetiram na mesma extremidade da sobreposição para ambos CP's. Na superfície lisa em contato com o molde.

Similar a seção anterior, o processo de laminação de união por sobreposição acarreta à superfície em contato com o molde uma possível concentração de tensão. E com os cps com união sem manta não foi diferente (Figura 58) e Apêndice G.

Figura 58 – Ponto de possível concentração de tensão para CPs com união sem manta

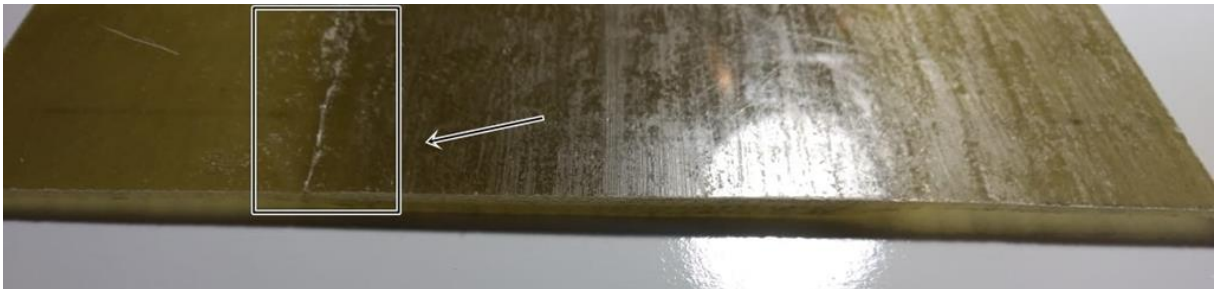


Fonte: O Autor (2019).

Cabe aqui um comentário que antes da adição dos reforços no processo de laminação, foi adicionado uma camada fina de resina para melhor acomodar as fibras, técnica esta sugerida por Nasseh (2008, p. 34).

A Figura 59 mostra a possível concentração de tensão em perfil.

Figura 59 – Perfil do laminado com união sem manta com uma possível concentração de tensão



Fonte: O Autor (2019).

É preciso um estudo mais aprofundado sobre o tema para afirmar que a concentração de tensão influenciou nos resultados, mas fato é que os corpos de prova com união sem manta ensaiados reproduziram a característica de falha, pontualmente na mesma localidade.

O fato ocorrido ressalta a relevância do uso de manta entre camadas de tecido, contribuindo para a melhor aderência interlaminar, mesmo resultando em uma maior variância de resultados.

Semelhante ao CP 2 da seção anterior, pode-se observar majoritariamente nos CP's com união sem manta (Apêndice F) o cisalhamento  $45^\circ$  seguido de uma delaminação. Isto induz a dizer que estes CPs tiveram os seus melhores resultados à resistência ao cisalhamento interlaminar. Pois, como pode ser visto, os corpos de prova com maiores resistência interlaminar, são caracterizados por um cisalhamento evidenciado com um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$ , ou seja, quão mais horizontal e/ou paralelo à direção longitudinal do CP, leva a crer que maior será seu valor de resistência ao cisalhamento na união.

Os gráficos tensão-deformação da Figura 49 assemelham-se com o do CP 4 da seção 8.2., onde o gráfico computa os rompimentos das fibras e representa na reta mudanças de inclinações, com um pequeno alívio momentâneo da força seguido de um deslocamento. Assim, supostamente indicando o comportamento da Figura 14a (fibras rompendo antes da matriz). O que a bibliografia em questão sugere como o ideal, aproveitando o máximo da resistência das fibras.

Em suma, a combinação do efeito de cisalhamento em  $45^\circ$  e o rompimento progressivo das fibras antes da matriz, induz a dizer que os CPs com união sem manta produziram resultados nas suas melhores performances diante do processo de laminação e união aplicado.

Quanto as deformações, os tecidos +45/-45 promove ao corpo de prova, maiores deslocamentos, pois suas fibras, neste caso, tornam-se curtas. Mas esse fato não é aconselhável

ser ponderado pela deformação medida através da máquina, e sim por um conjunto de extensômetros acoplados aos corpos de prova, afim de se obter maior precisão dos dados.

#### 8.4. ANÁLISE DOS RESULTOS DOS CPS CONTÍNUOS

O objetivo dos corpos de prova contínuos é comprovar que os CPs com união irão fraturar somente na região da sobreposição. E esta hipótese é válida quando os CPs contínuos obtiverem resistência a tração simples superior a resistência ao cisalhamento interlaminar dos CPs com união.

Como esperado, os corpos de prova contínuos com manta obtiveram uma resistência de tração média de 796,72 kgf (Tabela 6), enquanto os CPs com união de manta 595,15 kgf (Tabela 4). Similarmente, os CPs contínuos sem manta 509,24 kgf (Tabela 7), e os CPs com união sem manta 475,27 kgf (Tabela 5). Portanto, pode-se concluir com base nestes dados, Apêndices E e F e as análises estatísticas da seção 8.1.2 que a fraturas dos corpos de prova ocorreram exclusivamente na sobreposição interlaminar.

Diante desses resultados, também vale realizar a comparação entre os CPs contínuos, pois a presença de uma manta adicional não teve evidências estatísticas para concluir que os resultados dos ensaios de tração diferem. Logo, com uma probabilidade inferior a 5% de erro, os resultados obtidos induzem a dizer que as resistências dos CPs contínuos são iguais.

Fazendo a mesma análise para os cps com união, onde o teste estatístico da seção 8.1.2.1 mostrou que a resistência ao cisalhamento da união com manta é maior que a união sem manta com uma probabilidade de erro inferior a 0,5%. Assim, a presença da manta na sobreposição aumentou cerca de 25,22% a resistência interlaminar.

Portanto, esses percentuais pontua a importância de utilizar manta entre laminações de tecido, pois na resistência ao cisalhamento na união, ela contribuiu ao laminado 25,22% de carga adicional e nos CPs com seção constante sem união, ela não contribuiu negativamente para a resistência, uma vez que ambas são consideradas iguais.

## 9. CONCLUSÃO

Este trabalho fez um estudo de caso comparativo sobre a influência da utilização de manta entre laminados de tecido com plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).

Para tal, pesquisou-se em bibliografias de compósito os processos de laminação usualmente aplicados na indústria náutica, tais como seus equipamentos, vantagens e desvantagens além de suas aplicações específicas na construção de embarcações em compósito. Foram abordados métodos de laminação como: laminação manual, também conhecido como hand lay-up, laminação por projeção (spray-up), laminação a vácuo e infusão.

Dentre estes processos, foi escolhido a laminação manual, por se tratar de um processo com baixo custo de ferramental, etapas simples de fabricação e que produzem laminados com boas propriedades mecânicas.

Assim foram laminados 10 corpos de prova com união de manta e 10 corpos de prova com união sem manta e submetidos ao ensaio de tração, afim de obter a resistência ao cisalhamento interlaminar da sobreposição e utiliza-la como parâmetro de comparação.

Neste aspecto, os CPs laminados tiveram qualidades consistentes e aceitáveis para serem comparados. Pois priorizou-se laminar amostras com menor quantidade de bolhas de ar possível, boa compactação e homogeneidade de impregnação de fibra/matriz.

Os estudos realizados sobre falha e fratura de materiais compósitos poliméricos foram de rica serventia para criar um embasamento teórico e poder analisar e discutir os resultados do ensaio de tração. Assim como os estudos sobre as fibras de reforços do tipo manta e tecido que contribuíram para tal feito.

As características das falhas que foram apresentados pelos corpos de prova ensaiados em conjunto com os dados obtidos de resistência ao cisalhamento interlaminar na união, e as análises estatísticas levaram a crer que a presença de manta entre camadas de laminações de tecido contribui beneficemente para o aumento da resistência ao cisalhamento do compósito.

Os corpos de prova ensaiados com a presença da manta na união obtiveram um aumento da resistência ao cisalhamento de 25% comparado aos CPs com união sem manta. E os CPs que resistiram maiores carga, possuíam aspectos típica de fratura por cisalhamento, com propagação de trinca em 45° seguida de delaminação.

Portanto, neste estudo de caso que aborda a influência da presença da manta entre laminações de tecido, de fato, ela contribuiu de forma significativa para o aumento da resistência interlaminar do compósito. Logo, as referências bibliográficas como Marinucci

(2011), Nasseh (2011), Abmaco (2008) e outras tantas que abordam esse tema de forma teórica, com carência de dados experimentais, que sugerem uso de manta entre camadas de laminações de tecido, estão coerentes com os dados apresentados neste trabalho.

Uma das hipóteses para concluir tal feito, é que as características das mantas de serem fibras curtas descontínuas e aleatórias em combinação com a resina, promovem melhor aderência entre as camadas, supostamente devido a qualidade da manta em absorver resina. Pois segundo Nasseh (2007, p. 29) “O cisalhamento interlaminar é uma propriedade que depende muito da performance da resina e, outra vez, da sua resistência e poder de adesão”.

Todavia, neste trabalho mostrou que a laminação de manta entre as camadas de tecido tem poder de adesão maior que laminados de tecido sem a presença da manta. Onde a adesão se faz apenas entre resina e tecido.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar de forma igualitária os aspectos apresentados neste trabalho, avaliando uniões interlaminares com e sem manta em laminações com resinas epoxídicas com o uso de vácuo, seja laminação a vácuo ou infusão, e analisar a diferença de resistências das uniões com mantas de diferentes densidades.

## REFERÊNCIAS

- ABMACO. **Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências.** [S.l.], 2008.
- ABMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos.** [s.l.], 2009.
- AL-QURESHI, Hazim Ali. **Materiais compostos: análises e fabricação.** 1. ed. Florianópolis: UFSC/CEM, 2010. 469 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.** West Conshohocken: Astm International, 1995.
- AURÉLIO, M. **Coopmaco: Laminação manual,** p. 1, jul. 2014.
- BARBETTA, P. A.; BORNIA, A. C.; REIS, M. M. **Estatística: para cursos de engenharia e informática.** 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científico, 2012.
- CARVALHO, A. **Fiberglass x Corrosão: Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos.** São Paulo: Asplar, 1992.
- LAMINAÇÃO a Vácuo. Itraxcomposites. Disponível em: <https://www.itraxcomposites.com.br/laminacao-a-vacu>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- MAGALHÃES, A. G.; MORAIS, A. B.; MOURA, M. F. S. F. **Materiais compósitos: Materiais, fabrico e comportamento mecânico.** 2. ed. Porto: Publindústria, 2010.
- MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber, 2011.
- MAZUMDAR, S. K. **Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering.** Florida: Crc Press Llc, 2002.
- NASSEH, J. **Barcos - Métodos avançados de construção em composites.** Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2007.
- NASSEH, J. **Técnica e prática de laminação em composites.** Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2008.
- NASSEH, Jorge. **Manual de construção de barcos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.
- RESINA Poli 400. **Poliresinas.** Disponível em: <http://www.poliresinas.com.br/resina-poliester-400.html>. Acesso em: 04 nov. 2019.

SERRA Mármore. **Makita**. Disponível em:  
<http://www.makita.com.br/produtos/produto.asp?cod=4100NH3Z>. Acesso em: 01 nov. 2019.

TECIDO Fibra de Vidro Biaxial Ebx400. **E-Composites**. Disponível em: [https://www.e-composites.com.br/tecido\\_de\\_fibra\\_de\\_vidro\\_biaxial\\_ebx400/prod-4688404/](https://www.e-composites.com.br/tecido_de_fibra_de_vidro_biaxial_ebx400/prod-4688404/). Acesso em: 01 nov. 2019.

WEST SYSTEM. **Vacuum Bagging Techniques**. 7 ed. Bay City: Gougeon Brothers, 2010.



## APÊNDICE A – FIBRAS

### 1. FIBRA DE ARAMIDA

As fibras de aramida são fiadas a partir de poliamidas (nylon) aromáticas (ABMACO, 2008), a solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $-80^{\circ}\text{C}$ ), sendo depois extrudada a uma temperatura de aproximadamente  $200^{\circ}\text{C}$  (MAGALHÃES et al., 2010). As mesmas possuem a característica de ter uma resistência específica (resistência/densidade) muito grande, e nos últimos anos ela vem sendo bastante utilizada na construção de barcos (MARUNICCI, 2011), devido a sua grande rigidez associada a leveza (ABMACO, 2008). A resistência ao impacto, é uma variável importante a ser considerada na construção de uma embarcação, e as fibras de aramida têm uma alta habilidade a resistir a choques cíclicos (NASSEH, 2011), impedindo a propagação de trincas e microfissuras (MAGALHÃES et al., 2010). Porém a sua resistência a compressão é muito baixa comparada as demais fibras comercialmente utilizadas (MARINUCCI, 2011). Em aplicações náuticas, comercialmente usa-se o Kevlar® 49 (NASSEH, 2011).

### 2. FIBRA DE CARBONO

Diferente da aramida, as fibras de carbono possuem uma resistência ao impacto muito baixa, mas a sua resistência a tração e compressão são muito superiores (MARINUCCI, 2011). As mesmas são produzidas a partir de fibras precursoras (PAN – poliacrilonitrila) e ricas em carbono, cuja as transformações necessárias para sua obtenção são: (i) oxidação controlada ( $300^{\circ}\text{C}$ ), (ii) uma carbonização ( $1300$  até  $1800^{\circ}\text{C}$ ) e (iii) uma grafitização (até  $3000^{\circ}\text{C}$ ) em ambiente inerte (ABMACO, 2008).

A etapa de carbonização, de acordo com o teor de carbono definirá propriedades que classificarão o material em classes de fibras com alta resistência mecânica (HT), fibras de alto módulo de elasticidade (HM) e fibras de módulo intermediário (IM) (Tabela 1) (MARINUCCI, 2011).

Tabela 1 – Propriedades da fibra de carbono

	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Deformação na ruptura (%)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Elevada resistência (HT)	3400	238	1,5	1,77
Alto módulo (HM)	2350	358	0,6	1,79
Módulo intermediário (IM)	4100	295	1,5	1,77

Fonte: Marinucci (2011, p. 73).

As fibras de carbono são empregadas na grande parte dos barcos de competição na construção do casco, convés e estruturas internas, mastros, lemes, e diversas outras áreas de um barco onde são necessários rigidez e baixo peso (NASSEH, 2011).

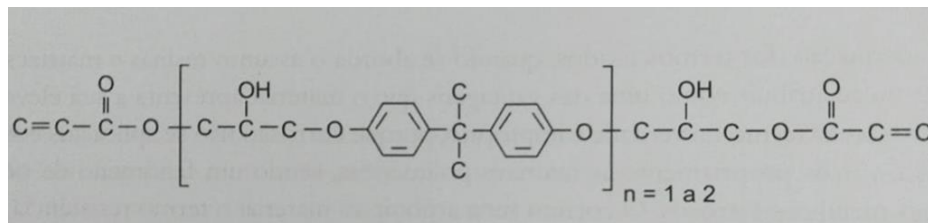
## APÊNDICE B – RESINAS

### 2.2.2. Resina Estervinílica

A resina estervinílicas ou viniléster é produzida pela esterificação (ácido carboxílico reage com um álcool produzindo éster e água) de uma resina epóxi com uma resina insaturada de ácido carboxílico (NASSEH, 2007). O produto da reação é dissolvido num solvente reativo, tal como estireno (ABMACO, 2008).

As resinas viniléster estão entre os materiais poliméricos mais indicados para aplicações que exigem elevada resistência química, sem que ocorra um comprometimento das propriedades mecânicas e elásticas do material (MARINUCCI, 2011). Fato este, devido as duplas ligações insaturadas (C=C) provenientes do processo de cura se localizam nas extremidades da cadeia, garantindo que reajam mais completamente durante a polimerização (Figura 1) (ABMACO, 2009).

Figura 1 – Representação de uma molécula da resina estervinílica



Fonte: Marinucci (2011, p. 42).

A consequência mais importante desse mecanismo de cura é que a resina curada apresenta menos pontos reativos residuais do que as resinas poliéster, formando uma estrutura química mais resistente (MARINUCCI, 2011)

### 2.2.3. Resina Epóxi

As resinas epóxi são obtidas pela reação de epiclorigrina com bisfenol e apresentam na sua molécula grupos terminais formados pela ligação de um átomo de oxigênio com dois átomos de carbono, chamados de grupos etoxilínicos (grupo epóxi) (MARINUCCI, 2011).

As principais resinas utilizadas na indústria de compósitos são: DGEBA (proveniente da reação de epícloridrina e bisfenol A, são as mais utilizadas, pois são versáteis e de baixo custo), DGEBF (a troca de bisfenol A por bisfenol F propicia melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curadas com aminas aromáticas ou anidridos) (ABMACO, 2008).

As resinas epóxi podem ser curadas com vários endurecedores e aceleradores, com uso ou não de calor, resultando em polímeros termofixos com elevado teor de ligações cruzadas (MARINUCCI, 2011), que propiciam ao material boas propriedades mecânicas, elevada temperatura de distorção térmica e transição vítrea, resistência ao envelhecimento pelo calor e ótima resistência química (ABMACO, 2008).

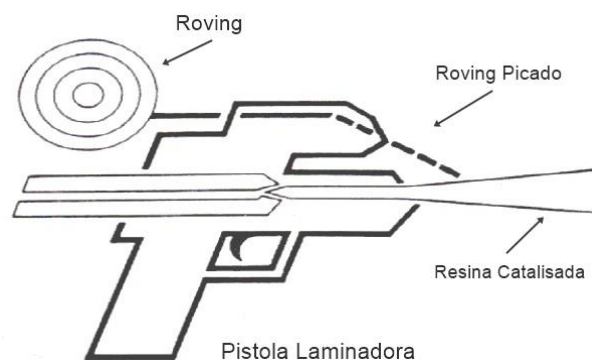
Assim, através da grande versatilidade de mecanismos de cura, as resinas epóxi tornam-se populares entre uma grande variedade de aplicações que exigem laminados de alta performance (NASSEH, 2011). Pois também possuem habilidade de aderir a um grande número de materiais, e é suma importância para o laminado que a matriz de resina seja capaz de aderir a todas as fibras e transmitir as tensões através do laminado (MARINUCCI, 2011).

## APÊNDICE C – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

### 3.2. LAMINAÇÃO POR PROJEÇÃO (SPRAY-UP)

A laminação por projeção representa uma evolução do processo de laminação manual por possibilitar um aumento expressivo da produção (MARINUCCI, 2011). Esse benefício é alcançado por um investimento que demanda a compra de um equipamento especial chamado de pistola laminadora ou pistola de laminação (Figura 1) (AURÉLIO, 2014). Onde a função do mesmo é jatear um fluxo controlado de fibra cortada ao molde simultaneamente com a resina catalisada (NASSEH, 2011). É um processo particularmente bem adaptado a peças com médias/grandes dimensões e com geometria simples.

Figura 1 – Pistola laminadora



Fonte: Aurélio (2014).

#### 3.2.1. Processo

No método spray-up o molde é preparado da mesma forma que na laminação manual (AURÉLIO, 2014), porém caso o laminador opte por utilizar gelcoat, sugere-se utilizar uma manta contínua de baixa gramatura laminada sobre o gel, pois a manta contínua oferece uma base melhor e mais homogênea para o gelcoat (NASSEH, 2011). Mas esse passo é opcional, e o construtor pode iniciar diretamente a aplicação do fio picado (NASSEH, 2011). Aurélio (2014) também comenta que ao invés da aplicação da manta contínua sobre o gel, pode-se aplicar uma fina camada de resina sobre o mesmo, pois este procedimento permite a moldagem das fibras de baixo para cima e facilita a remoção do ar preso no laminado.

Após a passagem da pistola com fibra de vidro picada e resina sobre o molde, um trabalho manual de rolagem e remoção de bolhas de ar é necessário para compactar a mistura vidro-resina sobre o molde, eliminando as bolhas geradas pelo sistema de projeção (ABMACO, 2008). A cada camada aplicada, sugere-se que a passagem de rolo lã para compactação e metal para a retirada de bolhas de ar (NASSEH, 2011). Nasseh (2011) ainda diz que o laminador deve operar a pistola de forma sequencial para garantir a homogeneidade no laminado, de preferência 90 ° da camada anterior que não recomenda ultrapassar uma espessura de 2 a 3mm para cada camada.

A espessura pode ser conferida inserindo-se medidores no laminado antes da gelificação da resina e a calibragem é feita pelo simples ajuste de válvulas reguladoras de fluxo (AURÉLIO, 2014).

Nasseh (2014) recomenda o uso de uma ventilação forçada quando for laminar com spray-up, de forma a remover gases de estireno e evitar a sua concentração em moldes mais profundos.

### **3.2.2. Equipamentos**

De forma que este processo se assemelha ao da laminação manual, porém de forma motorizada, assim chamado por Nasseh (2011), os equipamentos são similares a da laminação manual, acrescido da máquina de spray-up (pistola laminadora).

### **3.2.3. Vantagens e Desvantagens**

A maior vantagem deste método é a produtividade maior que a laminação manual, como melhor aproveitamento das matérias primas (NASSEH 2011), possibilita também a construção de moldes mais simples e baratos e não apresenta nenhuma restrição quanto ao tamanho das peças a serem laminadas (MARINUCCI, 2011). Abmaco (2008) diz que se trata de um processo que garante numerosas melhorias em relação a moldagem por contato (hand lay-up), também conta com duas variantes: deposição ou projeção sequencial, e projeção simultânea.

A desvantagens deste método são pertinentes, pois a qualidade do laminado depende é diretamente proporcional a habilidade do operador da pistola (NASSEH, 2011). Nasseh (2011) também afirma sobre a dificuldade ultrapassar 30% de teor de fibra no laminado, e ainda ressalta que em alguns casos é possível ter teor inferior a 20% o que acaba produzindo um

laminado rico em resina e com propriedades mecânicas bem baixa. Outra desvantagem desse processo, é manter uma espessura homogênea durante a laminação (MARINUCCI, 2011).

#### **3.2.4. Aplicações**

As peças mais comuns fabricadas pelo processo de projeção são os cascos para barcos de passeio, piscinas, capôs, fundos de tanques com grande diâmetro, banheiras etc.

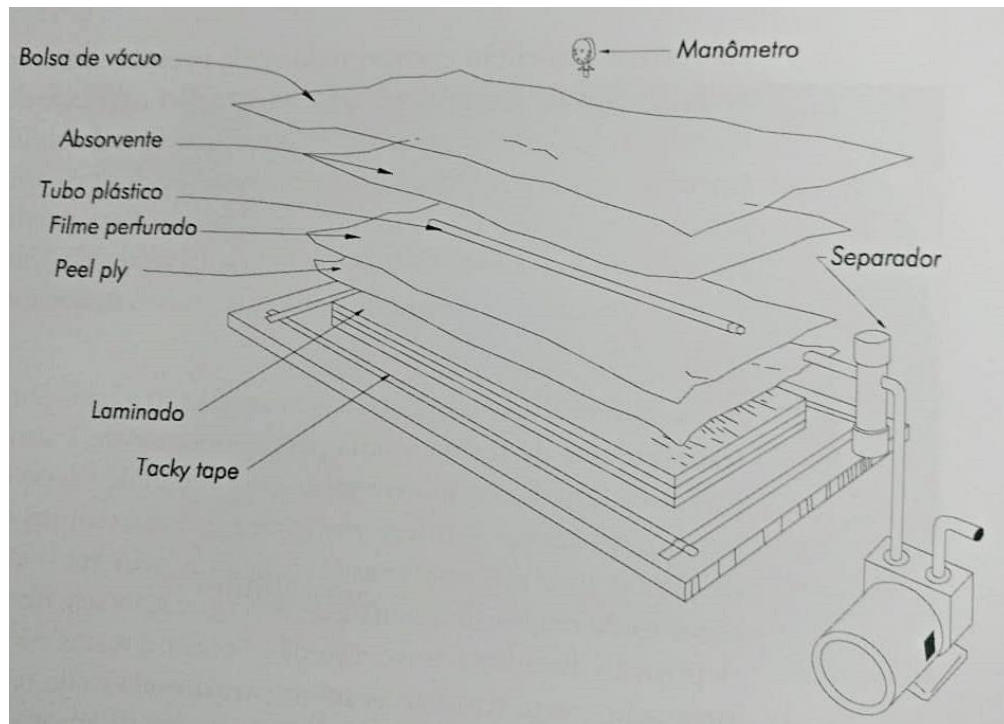
### **3.3. LAMINAÇÃO A VÁCUO**

O maior avanço na fabricação de barcos de regata one-off (projeto de construção única, não seriada) de alta performance e baixo peso foi sem dúvida alcançado com o uso de pressão durante o período de cura do laminado (NASSEH, 2011).

Este uso de pressão atmosférica controlada sobre o laminado proporciona uma melhor compactação das camadas e elimina o excesso de resina, produzindo peças com um teor de fibra maior, conseqüentemente mais leve e resistente ao cisalhamento e fadiga (ITRAXCOMPOSITE, 2019).

A pressão pode ser aplicada tanto pelo uso de um autoclave, moldes de encaixe macho e fêmea, ou bolsa de vácuo, sendo a última a mais simples e mais utilizada na construção de barcos (Figura 2) (NASSEH, 2011).

Figura 2 – Bolsa de vácuo



Fonte: Nasseh (2011, p. 410).

Nasseh (2011) comenta que neste método há materiais descartáveis, e por este motivo, pode aumentar os custos extras de produção, porém os benefícios alcançados compensam o custo extra. Ele também ressalta que a seleção dos materiais da bolsa a vácuo deve resistir a temperatura de exotermia da resina utilizada e também a temperatura de uma possível pós cura.

### 3.3.1. Processo

O processo de laminação a vácuo é totalmente semelhante a laminação do tipo manual (hand lay-up), iniciando com a aplicação do agente desmoldante sobre a superfície do molde limpo e seco e opcionalmente aplicado o gelcoat (NASSEH, 2011). Após a gelatinação do gelcoat, são adicionados os reforços e impregnados com resina em camadas individuais (NASSEH, 2011).

Nasseh (2011, p. 418) diz que o construtor deve medir a quantidade de resina correspondente ao reforço utilizado de como que ele inicie o processo de impregnação com 50% de teor de fibras, e dependendo da gramatura das camadas é possível fazer a peça em um estágio, caso o laminado exigir mais que 5kg/m<sup>2</sup> de resina, então a laminação deve ser feita em mais estágio.



Depois de colocar todas as camadas de reforços e as compactar manualmente, posiciona-se o peel ply sobre o laminado (NASSEH, 2011). Peel ply é um tecido liso e macio que não adere à resina e tem a função de separar o laminado dos demais materiais que serão posicionados a seguir (WEST SYSTEM, 2010).

As próximas camadas são de filme perfurado e material absorvente, nesta sequência. A utilização do filme perfurado é opcional e sua função é permitir a passagem da resina em excesso para o filme absorvente (NASSEH, 2011). Caso necessário, Nasseh (2011) sugere aplicar duas camadas de absorvente, para melhor absorver a resina.

A seguir, deve-se colocar as mangueiras de ar e posiciona-las na bolsa de vácuo e selar todo o seu perímetro com fita selante (NASSEH, 2011). Nasseh (2011, p. 420) recomenda: “Sempre deixe pelo menos 20% da área da bolsa de vácuo em excesso para que ela possa acomodar as diferenças de geometria e espessura da peça”.

Então, a bomba de vácuo é conectada à bolsa de vácuo e acionada (WEST SYSTEM, 2010). De acordo com Nasseh (2011, p. 420): “Se for necessário mantenha a pressão baixa por um bom espaço de tempo até que todo o perímetro da peça esteja ajustado e somente após ter certeza que tudo está completamente em ordem acione toda a pressão de vácuo”.

Na fabricação de laminado sólido, ou mesmo a laminação completa das duas faces do laminado, deve ser usado uma resina que permita tempo suficiente de trabalho de modo que seja possível impregnar as fibras e fechar a bolsa de vácuo enquanto a resina não atingiu o tempo de geltime (NASSEH, 2011).

Após a cura do laminado, remove-se a bolsa a vácuo, o material absorvente, filme perfurado e o peel ply. Então realiza-se a desmolagem (NASSEH, 2011).

### **3.3.2. Equipamentos**

Além dos equipamentos comuns ao processo de laminação manual, neste processo também são utilizados:

- Filmes perfurados (NASSEH, 2011);
- Peel ply: também pode ser substituído por nylon e deve permitir a passagem de resina e permitir a remoção do produto mesmo nas condições de colagens mais rígidas. (NASSEH, 2011);
- Materiais absorventes: devem ter estabilidade dimensional para não se partirem dentro do molde (NASSEH, 2011);

- Fita selante (tacky tape): deve ter boa adesividade entre a bolsa e o molde e ser de fácil remoção do molde (NASSEH, 2011);
- Bolsa de vácuo: pode ser descartável ou do tipo permanente, que pode ser usada por um número determinado de laminações. É preferível que seja transparente para permitir a inspeção do processo de cura do laminado (WEST SYSTEM, 2010);
- Linha de vácuo: constituída por mangueiras, válvulas e marcador de pressão (NASSEH, 2011);
- Bomba de vácuo: As especificações dependem do tamanho e formato do molde e da velocidade de retirada do ar (WEST SYSTEM, 2010). Nasseh (2011) recomenda que a bomba possua um filtro para reter partículas sólidas e vapor de resina.

### **3.3.3. Vantagens e Desvantagens**

Em comparação com o processo de laminação manual, a peça produzida por este processo apresenta menos espaços vazios, menor densidade e menos resina, em consequência, tem-se um elevado teor de fibra no laminado, podendo chegar a 65% (NASSEH, 2011). O uso da pressão a vácuo também promove uma melhor compactação no laminado, dando mais aderência entre as camadas (WEST SYSTEM, 2010). A maior aderência entre as camadas contribui para a redução de falhas por cisalhamento interlaminar (delaminação das camadas), assim esta técnica permite o uso de combinação de vários materiais, especialmente quando laminados com resina epóxi (NASSEH, 2011).

Como desvantagens, West system (2010) cita as limitações no tamanho e formato da peça devido à capacidade da bomba de vácuo. Nasseh (2011) afirma que moldes acima de 6 metros de comprimento, faz-se necessário a utilização de duas bombas vácuo, uma em extremidade a outra. Ainda Nasseh (2011) comenta que o tempo de laminação é limitado pela cura da resina, além do custo adicional pela utilização de produtos descartáveis e da bomba de vácuo.

### **3.3.4. Aplicações**

Dentre as aplicações no setor náutico, esta técnica é utilizada na fabricação de anteparas, divisórias, pisos de embarcações na faixa de 30 a 80 pés (9,15 a 24,4 metros), cascos

de barcos que necessitam de propriedades mecânicas superiores a laminação manual e mobiliário interno de embarcações de recreio (NASSEH, 2011).

### 3.4. INFUSÃO

O processo de infusão a vácuo, conhecido como VIP (vacum infusion process), é uma técnica que pode ser considerada como sendo de moldagem fechada, embora não tenha um par de moldes, pois utiliza apenas o molde que dará a forma geométrica da peça e um saco de vácuo (MARINUCCI, 2011). Este processo é usado nos últimos anos para laminação de peças de barcos com alto grau de qualidade (NASSEH, 2011).

A diferença deste processo com a laminação a vácuo, é que neste caso todo o material é colocado seco dentro do envelope plástico ou bolsa de vácuo, depois a resina é transferida para dentro das camadas de fibra pela ação do diferencial de pressão interna e externa (NASSEH, 2011).

Abmaco (2008) também afirma que a resina pode ser injetada em baixa pressão, e a mesma deve possuir uma baixa viscosidade. Nasseh (2011) diz que referente da laminação a vácuo que se pode iniciar o vácuo em baixa pressão e aumentar gradualmente, na infusão é sempre necessário conseguir um diferencial de pressão de pelo menos 0,9 atm.

Marinucci (2011) comenta que o processo na sua concepção é simples e dispensa a necessidade de mão de obra especializada, porém necessita de um arranjo cuidadoso na montagem do saco de vácuo.

#### 3.4.1. Processo

Após a preparação do molde (limpeza, aplicação do agente desmoldante e gelcoat), reforços são posicionados na quantidade necessária para obter a espessura final desejada para a estrutura, executando um trabalho que se costuma chamar de alfaiataria (MARINUCCI, 2011).

Abmaco (2008) comenta que pode ser utilizado uma cola leve para auxiliar no posicionamento, uma vez que os reforços são colocados seco sobre o molde.

A sequência da laminação a vácuo requer peel ply, filme perfurador, filme absorvente e finalmente a bolsa de vácuo; no processo de infusão tanto o filme perfurado quanto o absorvente são desnecessários (NASSEH, 2011).

Sendo assim, após a adição e posicionamento dos reforços, é colocado o peel ply, que tem a mesma função da laminação a vácuo, ou seja, separar o laminado dos demais materiais

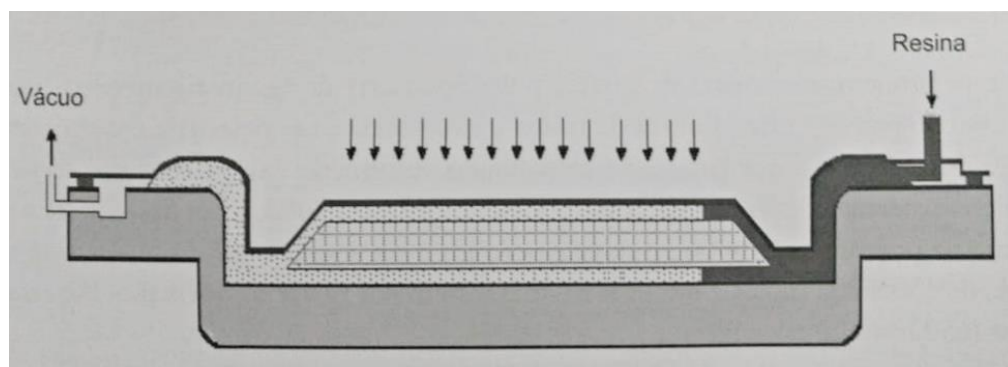
(NASSEH, 2011). Feito isto, posiciona-se as mangueiras de sucção de ar e as mangueiras para injeção de resina (ABMACO, 2008). Marinucci (2011) ressalta que o projeto de injeção necessita de estudos preliminares para dimensionamento de pontos de vácuo e pontos de injeção no molde para que todo o reforço possa ser impregnado adequadamente. E também comenta que há softwares de simulação que analisam o percurso e a injeção da matriz utilizando vários canais de alimentação.

Desta forma, a escolha da resina é um fator importante na infusão. Pois no processo a vácuo o construtor necessita de uma resina que tenha algumas horas de trabalho antes de fechar a bolsa de vácuo; no processo de infusão, a resina deve ser movida para dentro das cavidades do laminado em alguns minutos (NASSEH, 2011, p. 426).

Complementando, Nasseh (2011) informa que para reforços de fibra de vidro, o processo de infusão possibilita o uso de resinas poliéster ou estervinílica, porém para fibra de aramida ou carbono, deve-se sempre utilizar resina epóxi.

Finalmente, após colocado os reforços, peel ply, mangueiras de ar, e conexão para entrada da resina, é posto o saco de vácuo, selado e aplicado o vácuo. E após aplicado o vácuo, é injetada a matriz polimérica (Figura 3) (MARINUCCI, 2011). E após a cura do laminado, retira-se os materiais utilizado e desmolda a peça (NASSEH, 2011).

Figura 3 – Infusão



Fonte: Marinucci (2011, p. 195).

### 3.4.2. Equipamentos

Os equipamentos são semelhantes aos utilizados na laminação a vácuo.

Adicionalmente são necessárias (ABMACO, 2008):

- Mangueiras de alimentação: devem suportar a pressão atmosférica com vácuo interno sem se fecharem. É útil que sejam transparentes;

- Mangueiras de fluxo: são cortadas em espiral, tanto para o ar ser retirado quando;
- para que ocorra a alimentação da resina.

### **3.4.3. Vantagens e Desvantagens**

Dentre as vantagens deste método, estão a boa reprodutividade, devido à menor dependência de execuções de tarefas para compor o laminado (ABMACO, 2008), pode-se laminar peças complexas e de grandes dimensões com preço aceitável (ABMACO, 2008), o teor de fibra neste processo fica em torno de 60% a 70% (NASSEH, 2011), assim produz laminados com boas propriedades mecânicas e baixo volume de vazios (MARINUCCI, 2011). Também possui uma redução da resina utilizada em consequência reduz a emissão de produtos orgânicos voláteis no meio ambiente.

Como desvantagens, a fabricação de uma peça necessita o domínio dos vários parâmetros que regem esse processo (nível de vácuo, injeção, viscosidade da resina e velocidade da infusão da resina) para evitar zonas mal impregnadas (ABMACO, 2008). Outra desvantagem que Abmaco (2008) cita é que todos os materiais auxiliares, como vedantes e mangueiras, não são reutilizáveis.

### **3.4.4. Aplicações**

Os maiores mercados para o processo de infusão são os setores náuticos em peças com grandes dimensões e formas complexas e no setor de energia eólica, na fabricação de pás que podem chegar a 50 metros de comprimento (MARINUCCI, 2011).

## APÊNDICE D – TECIDO CONTAMINADO

Inicialmente, a intenção era confeccionar corpos de prova com reforços de tecido biaxial woving roving de 300g/m<sup>2</sup> (Anexo E), porém após algumas tentativas, pode-se constatar que o mesmo estava contaminado. Desta forma, foi realizado a substituição por tecido biaxial +45/-45 400g/m<sup>2</sup> (Anexo F) que será utilizado nas laminações definitivas dos corpos de prova.

A seguir, descreve-se o início do processo de laminação à constatação da contaminação do tecido.

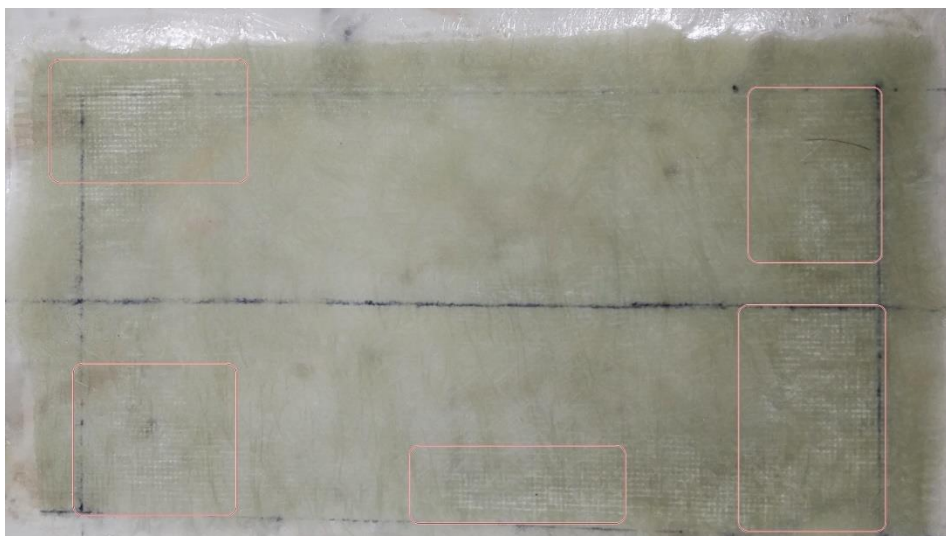
Com temperatura ambiente de 17°C e humidade relativa do ar de 84%, foram laminados duas superfícies planas com dimensões de 200mm de comprimento e 400mm de largura cada.

O tecido de fibra de vidro tipo E WR com 300g/m<sup>2</sup> foi utilizado na primeira camada, e posteriormente foi acrescentado uma camada de manta de fibra de vidro com 450g/m<sup>2</sup>.

Como reforço, foi utilizado 75g de resina poliéster insaturada ortofitálica iniciada a 1%, 23g de manta e 29g de tecido mantendo uma relação de proporção de 2:1 para manta e 50%-50% para o tecido como sugerido por Nasseh (2011).

Após 12 horas de cura nestas condições, observou-se que a resina não estava impregnada no tecido WR. Criando um aspecto esbranquiçado no laminado conforme representado na Figura 1. Logo, considerou-se a hipótese que o perfil estava sub-laminado, ou seja, resina insuficiente para a laminação.

Figura 1 – Primeiro perfil de laminado com hipótese de sub-laminado

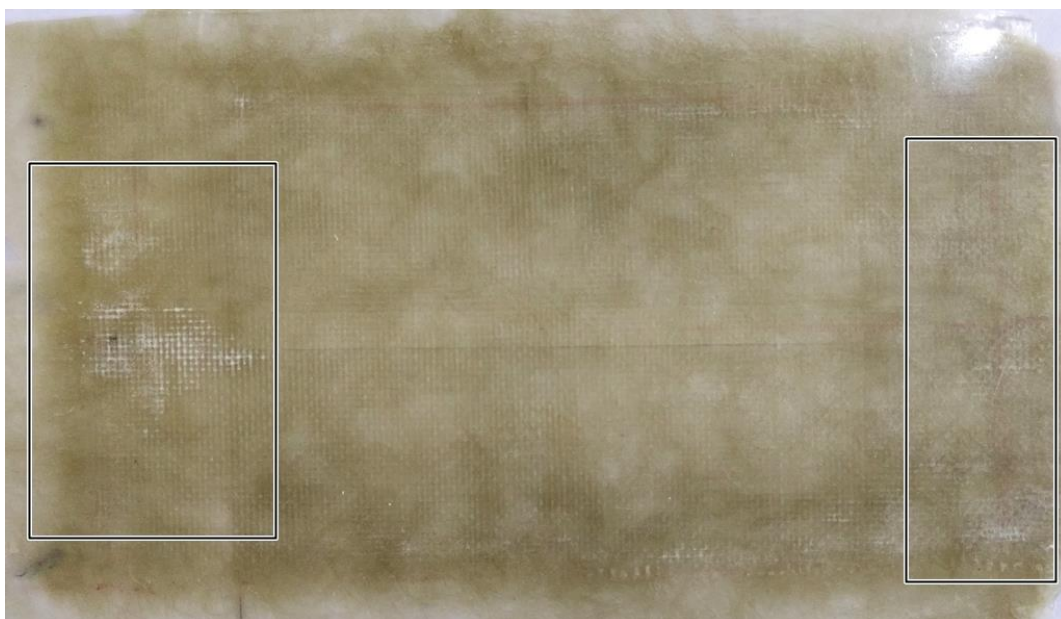


Fonte: O Autor (2019).

Devido ao ocorrido, decidiu-se usar a relação 80:20 de resina em relação ao teor de fibras (ABMACO, 2008).

Desta vez, com temperatura ambiente de 20°C e humidade relativa do ar de 84%, realizou-se a segunda tentativa de laminação. Porém, os aspectos observados da Figura 26 se repetiram nesta laminação (Figura 2).

Figura 2 – Segundo perfil de laminação com hipótese de sub-laminado



Fonte: O Autor (2019).

Nestas alturas, a hipótese de sub-laminado foi descartada, sendo a relação 80:20 descrita acima, um tanto quando conversadora, o que difere da proporção utilizada no primeiro perfil de laminação proposto por Nasseh (2011).

Afim de verificar que o erro de laminação não estava sendo cometido pelo laminador, foi refeita uma nova laminação mantendo a proporção 80:20, porém, cada etapa foi cuidadosamente refeita, buscando homogeneizar seguindo os procedimentos de laminação manual descritos no capítulo 3. O resultado foi o mesmo, como esperado, novamente o tecido estava com aparência esbranquiçada (Figura 3).



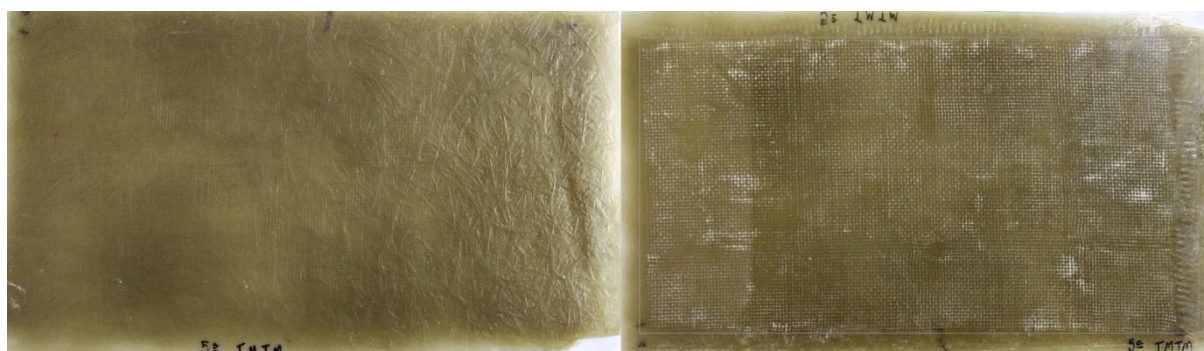
Figura 3 – Terceiro perfil de laminação



Fonte: O Autor (2019).

Outras duas laminações ainda foram feitas nestas circunstâncias, porém a alteração foi diminuir o tempo de espera entre laminações de 12h para 3h, ou seja, foi laminado tecido e manta, aguardado 3h e novamente laminado tecido e manta. O resultado está na Figura 4 e como podemos perceber, o problema persiste!

Figura 4 – Última laminação tecido-manta-tecido-manta



Fonte: O Autor (2019).

As partes brancas destacadas nas imagens, podem ser caucionadas por diversos fatores, como qualidade de resina, catalisador, manta, tecido e até mesmo a técnica de laminação (ABMACO, 2008). Porém várias laminações foram feitas para detectar a causa, como vimos anteriormente.



Mas devido aos esbranquiçados estarem concentrados nas regiões do tecido WR, logo, concluiu que o problema poderia ser a qualidade do tecido. De fato, após uma análise visual do mesmo (Figura 5), pode-se observar contaminações, regiões com sujeira e aspecto humedecido.

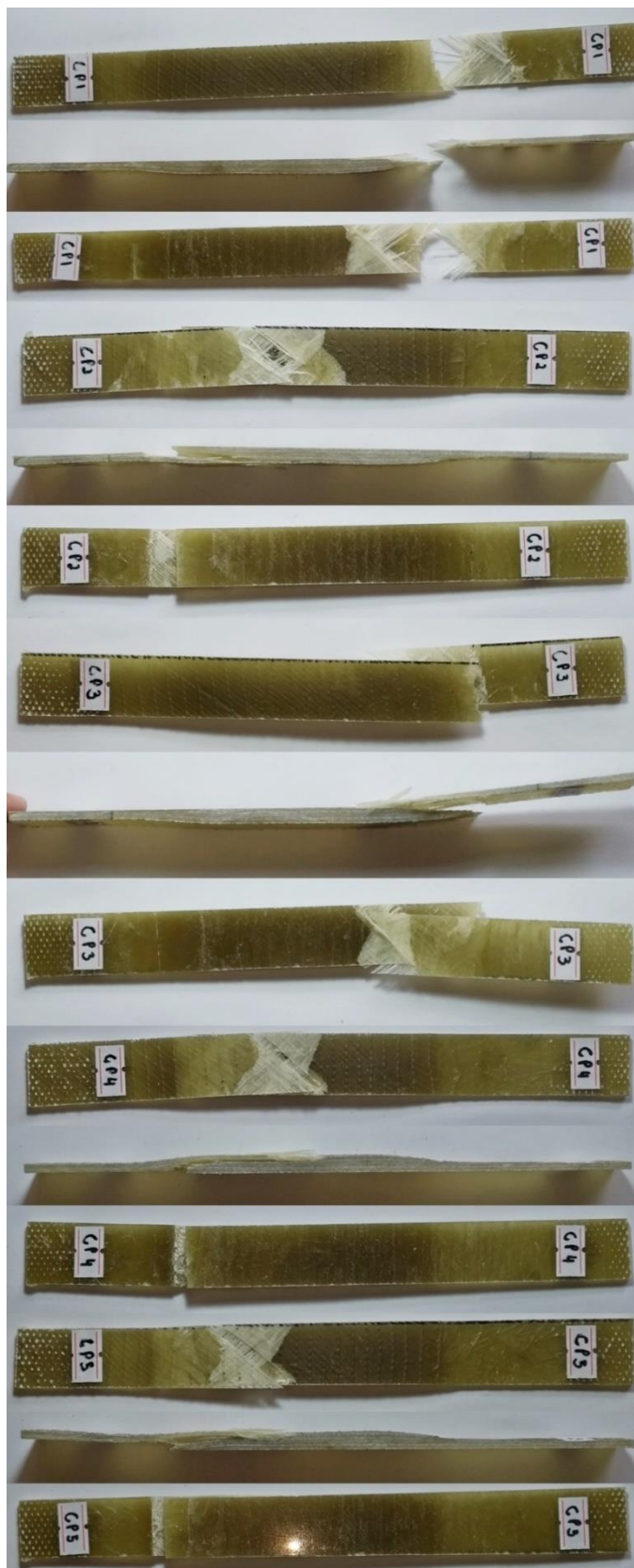
Figura 5 – Tecido Woving Roving com contaminação



Fonte: O Autor (2019).

Por este motivo, o tecido WR foi substituído por um tecido biaxial  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$  400g/m<sup>2</sup>.

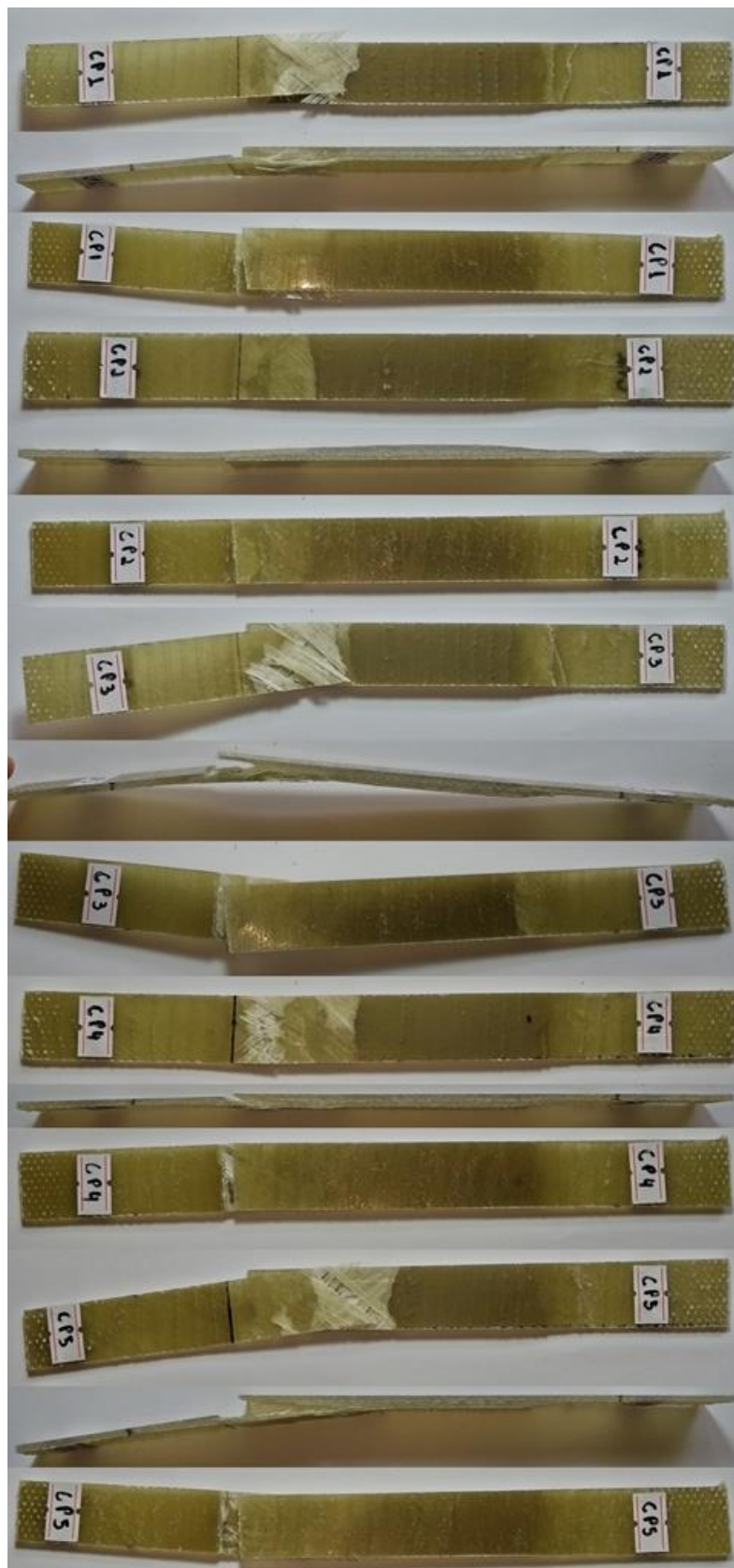
## APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA COM UNIÃO DE MANTA

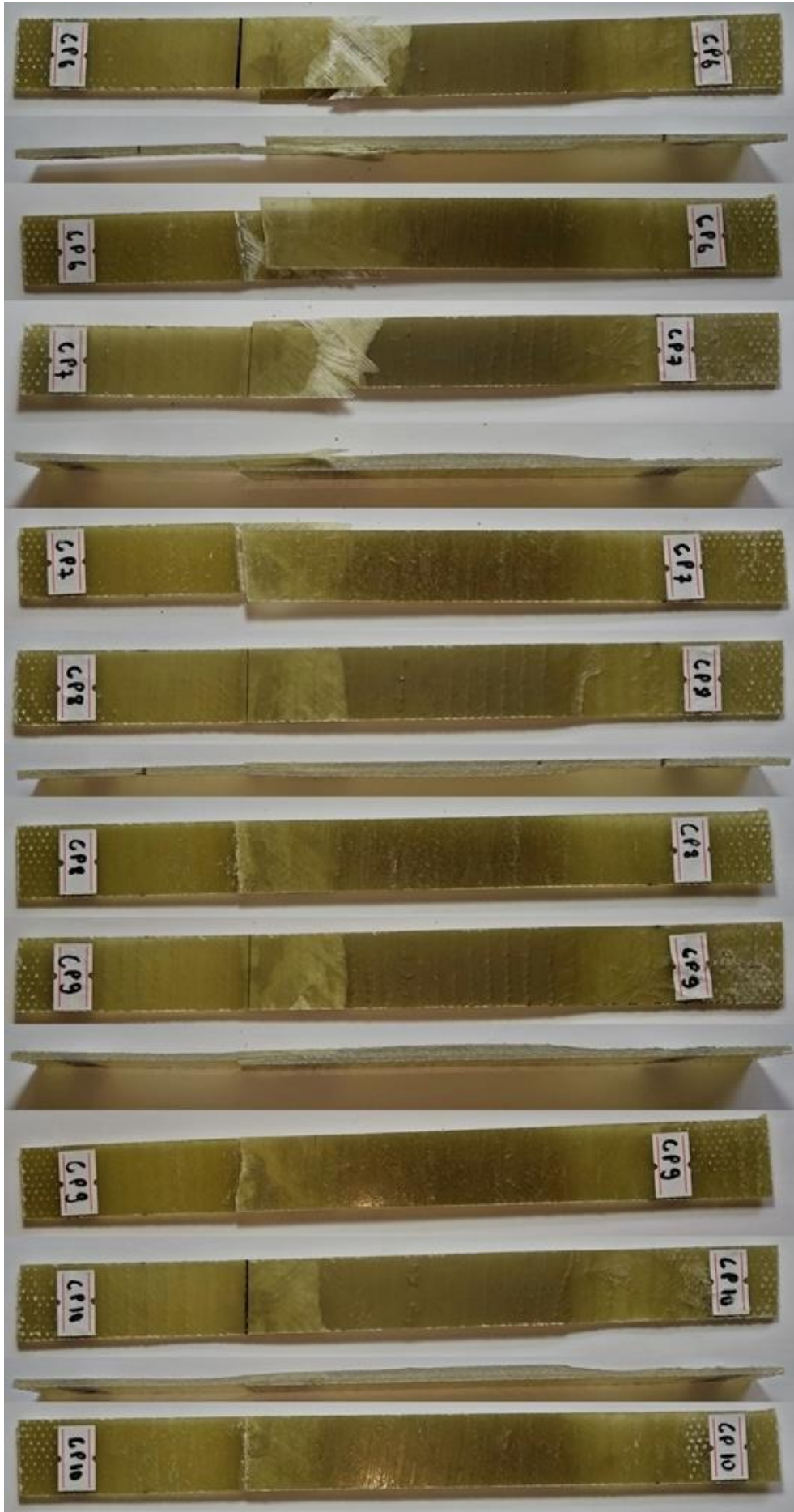




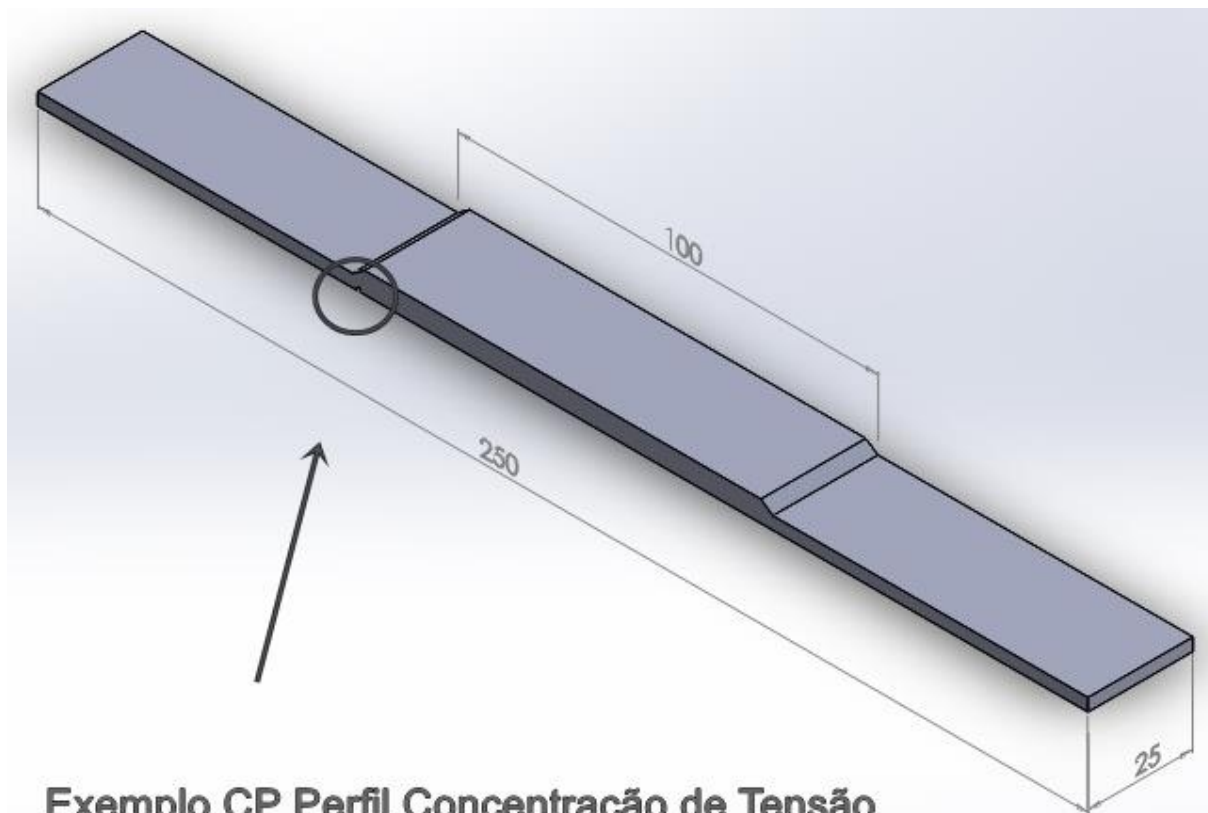


## APÊNDICE F – CORPOS DE PROVA COM UNIÃO SEM MANTA

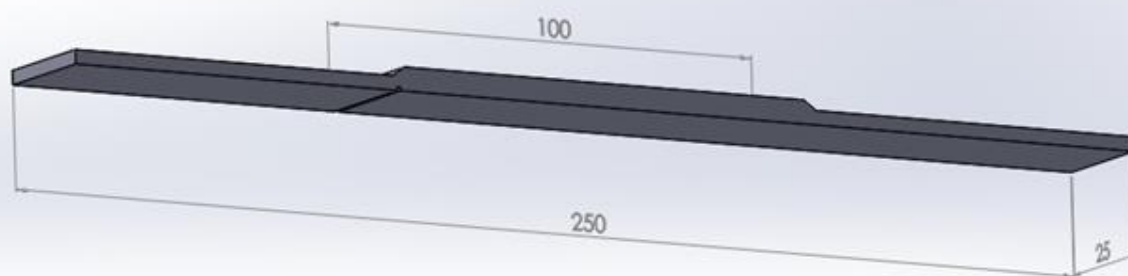
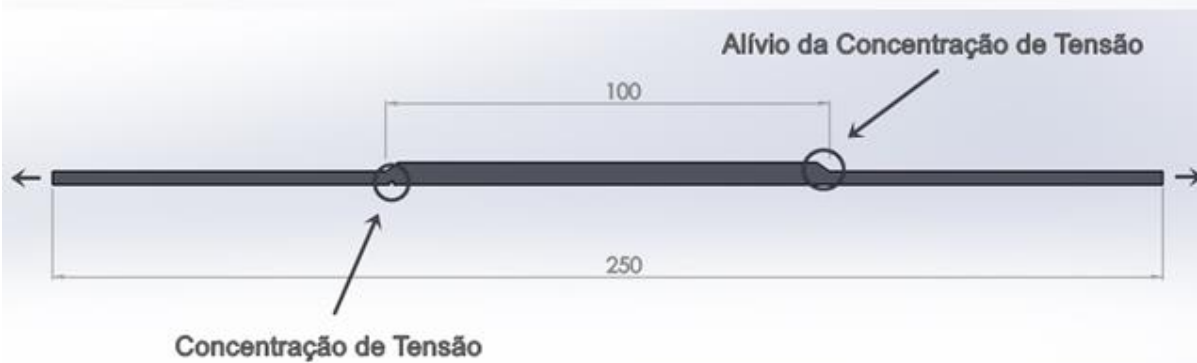




## APÊNDICE G – EXEMPLO DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO



**Exemplo CP Perfil Concentração de Tensão**





## ANEXO A – MANTA



### BOLETIM TÉCNICO

### MANTAS DE FIBRA DE VIDRO

Manta para Laminação Manual - M710B

#### Descrição

A manta M710B é um material de reforço obtido de fibras de vidro Advantex™ cortadas, aglutinadas umas às outras através de ligante de alta solubilidade em monômero de estireno, com compatibilidade com resinas poliéster, vinil éster e epóxi.

O vidro Advantex™ combina as excelentes propriedades mecânicas e elétricas do vidro E com a resistência à corrosão de ácidos do vidro E-CR, atendendo aos requerimentos estabelecidos nas normas ISO 2078 e na ASTM D578-98, tanto para o vidro E como para o vidro E-CR.

As fibras são cortadas e distribuídas de maneira uniforme e aleatória, originando, no plano das mantas, laminados com propriedades isotrópicas.

Este produto foi desenvolvido para ser usado como reforço para peças que são fabricadas no processo de laminação manual em molde aberto (hand lay-up).

#### Destaques

- Compatível com resinas poliéster, viniléster e epóxi
- Rápida molhagem
- Redução no consumo de resinas
- Aumento de produtividade
- Baixa marcação no gelcoat
- Menor liberação de penugem

#### Benefícios

##### Compatível em Poliéster, Viniléster e Epóxi

A manta M710B foi desenvolvida para que possa reforçar resinas poliéster ou viniléster, sendo usada também com resinas epóxi.

##### Rápida Molhagem

Rapidez de molhagem significa menos tempo de laminação e menor custo.

##### Redução no Consumo de Resinas

Com a alta rapidez de molhagem, o consumo de resina é significativamente reduzido.

##### Aumento de Produtividade

Outra característica marcante deste produto é a facilidade de roletagem e eliminação das bolhas de ar, que diminui sensivelmente o esforço do Operador, aumentando a produtividade e a vantagem competitiva do Transformador.

##### Baixa Marcação do Gelcoat

A marcação do gelcoat é minimizada devido a grande uniformidade desta manta. Os produtos com pouca marcação de gelcoat têm melhor aparência e maior aceitação no mercado.

##### Menor Liberação de Penugem

Maior conforto para o Operador devido a menor liberação de penugem durante o manuseio do produto.



### Dados do produto

Gramagem (g/m <sup>2</sup> )	225	300	375	450	600
Diâmetro interno do rolo (cm)	10				
Diâmetro externo do rolo (cm)	32 ± 2				
Largura padrão (cm)	140				
Perda ao fogo (%)	5,5	3,4	2,8	2,0	2,5
Peso (kg)	47	50	60	60	65

### Propriedades Mecânicas dos Laminados

Ensaio	MPa (seco)	MPa (úmido)
Resistência à Tração	76 - 96	69 - 83
Módulo de Tração	7500 - 8900	5200 - 6200
Resistência à Flexão	165 - 193	130 - 140
Módulo de Flexão	7500 - 8900	5300 - 6200

### Embalagem

A manta M710B é enrolada sobre tubetes de papelão, embalada com stretch film de polietileno transparente e paletizada. Os paletes são protegidos externamente, contra poeira e umidade, com filme plástico esticável. Alguns rolos podem apresentar descontinuidades. Estes rolos são sinalizados, no local do corte, por uma tira de papel com a inscrição "Corte Interno".

### Estocagem

As fibras de vidro devem ser armazenadas em sua embalagem original, em local fresco e seco.

### Validade

Não existe restrição quanto a data limite para utilização de fibras de vidro quando estas são estocadas à temperatura ambiente e em sua embalagem original.

### Informações Adicionais:

Para maiores informações,  
Consulte a FISQP e nosso Departamento Técnico:

Tel./Fax: (047) 3453-3328 – Joinville - SC

Site: [www.sama.ind.br](http://www.sama.ind.br)

e-mail: [sama@sama.ind.br](mailto:sama@sama.ind.br)

As informações contidas neste boletim, são fornecidas de boa fé e estão corretas baseadas em nossas experiências e conhecimentos, como não temos qualquer controle sobre o uso de nossos produtos. Solicitamos aos clientes testarem seus produtos na inspeção de recebimento para sua finalidade antes do uso. Nenhuma garantia expressa ou implícita, é dada ou sugerida. Não assumimos assim, qualquer responsabilidade quanto a rendimento, desempenho ou quaisquer danos materiais ou pessoais decorrentes do uso das informações acima ou do armazenamento e manuseio em condições inadequadas.



## ANEXO B – RESINA POLIÉSTER ORTOFITÁLICA INSATURADA



BOLETIM TÉCNICO

**ARAZYN 4.9- BOLETIM  
TECNICO DA FAMILIA**

ARA QUÍMICA S/A. - RUA ARTHUR CÉSAR, 200  
18147-000 - ARAÇARIGUAMA - SP - BRASIL • TEL: 0 (XX) 11 4136 1900

BTE DOCUMENTO 000156

### RESINA POLIÉSTER INSATURADO, ORTO-TEREFTÁLICA, BAIXA REATIVIDADE

#### DESCRIÇÃO:

A resina padrão da família AZ 4.9 de média reatividade, pré-acelerada e tixotrópica, apresenta, no estado líquido, viscosidade baixa e coloração levemente esverdeada, boa molhabilidade em mantas, rovings e tecidos em fibra de vidro, inclusive carga, e excelente fluidez para aplicação tipo hand lay-up e spray-up. . Após a cura, quando em combinação com fibra de vidro, forma um compósito de alta resistência .

#### OUTRAS RESINAS

Na mesma família, existem outras resinas com características específicas quanto ao gel time, aceitação de alto teor de carga etc.

#### SUGESTÕES DE USO

Em conjunto com fibra de vidro, na fabricação de peças de PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro), usando moldes abertos, por contato, com aplicação do tipo spray-up e hand lay-up (laminação).

Admite o uso de caras, seja para adquirir características retardantes ao fogo através da alumina tri-hidratada num teor equivalente a 30%, seja para redução de custos, quando usado com carbonato de cálcio.

Usada em piscinas, barcos e caixas d'água com reforço de fibra de vidro. Atende aos mais variados segmentos de mercado, exceção feita ao mercado de corrosão onde as resinas devem ser quimicamente mais nobres.

A resina padrão da família AZ 4.9 aceita como produtos modificadores, corantes na forma pura ou pigmentos na forma de pastas de poliéster não reativo, monômero de estireno como diluente, acelerados ou inibidores de cura e cargas. Há necessidade de testes para identificar o grau de aceitação de cada um desses aditivos. Certamente, a adição deles afeta as características da resina padrão. Em caso de dúvidas, consultar o departamento técnico da AraAshland.

#### PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 4.9 - Padrão

Viscosidade Brookfield(25°C/LVF sp 2/30 rpm) , cps	250-350
Gel Time ( 25°C c/1,0 g MEK-P em 100 g resina), minutos	10' - 15'
Intervalo Pico , minutos	Max. 12'
Pico Exotérmico, °C	Max. 190
Índice de Acidez (em solução), mg KOH/ g resina	max. 30
Aspecto	turvo
Cor (curada)	castanha
Teor de Sólidos, %	min. 57 %
Tixotropia (25°C sp 2/ 6-60 rpm)	1,24

*OBS: Os valores das propriedades acima obtidos resultam da resina AZ 4.9 na sua forma original (padrão) Qualquer produto adicionado à mesma, afetará tais valores. O catalisador (MEK-P) usado, possui teor de oxigênio ativo de 8,9 a 9,1% e umidade máxima de 3%.*

*CURA: Usar MEK-P como catalisador num teor que pode variar de 0,7 à 2,0%. A escolha do teor de MEK-P está diretamente ligada à espessura e volume da peça, bem como à temperatura ambiente.*

©Marca registrada da Ara Química S. A.

Nota: Os dados e resultados de laboratório contidos neste boletim foram determinados pela AraAshland através de métodos de análise específicos. A AraAshland não garante a duplicação destes resultados por terceiros. Todos os dados apresentados são fornecidos de boa fé e, tendo a intenção de ser precisos. Os valores são orientativos e todas as recomendações ou sugestões contidas ou baseadas neste boletim deverão ser avaliadas pelo cliente a fim de determinar a aplicabilidade ou adequação para seu uso particular.

Todas as etiquetas e notas de precaução devem ser lidas e entendidas pelo cliente. Consulte a AraAshland e as regulamentações oficiais para maiores informações adicionais sobre segurança e saúde no manuseio do produto. O cliente é responsável por estar em acordo com a aplicabilidade das leis federais, estaduais ou municipais e regulamentos que cubram o uso do produto. Deve-se dar a maior atenção às aplicações do consumidor final.

## ARAZYN® 4.9 (continuação)

---

### PROPRIEDADES MECANICAS - VALORES TÍPICOS\*

---

PROPRIEDADES FÍSICAS DA RESINA CURADA\*\* À 25 °C SEM REFORÇO( pós cura de 2 horas à 90°C):

<u>TESTE</u>	<u>VALOR</u>	<u>MÉTODO DE TESTE</u>
Resistência à Tração, psi	7.100	ASTM D-638
Módulo na Tração, psi X10 <sup>5</sup>	3,0	ASTM D-638
Alongamento, %	2,5	ASTM D-638
Resistência à Flexão, psi	10.000	ASTM D-790
Módulo na Flexão, psi X10 <sup>5</sup>	4,2	ASTM D-790
Temperatura de Distorção Térmica, °C	80	ASTM D-648
Dureza Barcol , 2 horas, B	35-40	ASTM D-2583

*\*Valores Típicos: Baseados em materiais testados em nossos laboratórios, mas com variação de amostra para amostra. Valores típicos não devem ser considerados como uma garantia de análise de algum lote específico ou como item de especificação.*

*\*\*Sistema de Cura: 1,0 g de MEK-P em 100 g de resina, seguido de pós cura de 2 horas à 90°C.*

EMBALAGEM PADRÃO:	Tambor não retornável com 220 kg (peso líquido)
IDENTIFICAÇÃO REQUERIDA:	Líquido inflamável
CÓDIGO:	AZ 4.9#00 (padrão)
	AZ 4.9#XX (outras resinas da mesma família)

#### MANUSEIO:

A resina AZ 4.9 contém produtos que podem ser perigosos se não forem manuseados adequadamente. O contato com a pele e olhos deve ser evitado e é necessário o uso de EPIs (Equipamentos de Proteção Individual).

A AraAshland mantém a FISP (Folhas de Informações de Segurança de Produto) de todos os seus produtos à disposição do consumidor. As FISPs contêm informações de segurança, saúde e procedimentos adequados de manuseio, a fim de proteger seus empregados e consumidores.

#### ARMAZENAMENTO RECOMENDADO:

Tambores: Manter à temperatura de 25°C ou menor. O tempo de vida do produto na estocagem diminui com o aumento da temperatura de estocagem. Evite exposição às fontes de aquecimento tais como luz do sol ou tubulações de vapor. Manter a embalagem vedada para prevenir contra umidade e evaporação do estireno.

Tanques: Armazenar em tanques de aço inoxidável ou revestido com tinta de base epóxi ou fenólica. Verifique as condições de armazenagem de forma a evitar umidade e/ou calor

#### VIDA ÚTIL:

Este produto tem vida útil limitada. Quando armazenado de acordo com as recomendações acima, o produto tem vida útil mínima de 03 (três) meses.

## ANEXO C – INICIADOR BRASNOX DM50



## BRASNOX® DM50

### DESCRIÇÃO

**Brasnox® DM 50** é um peróxido de metil etil cetona em dimetilftalato indicado para cura de resina poliéster insaturada e éster vinílica.

### PROPRIEDADES TÍPICAS

Aspecto.....	Líquido, Límpido e Incolor
Oxigênio Ativo (%).....	8,80 – 9,00
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ; 25°C).....	1,13 – 1,15
Solúvel em.....	ftalatos, cetonas, alcoóis e glicóis
Insolúvel em.....	hidrocarbonetos aromáticos clorados e alifáticos
SADT (Temperatura de Decomposição em Auto-aceleração) (°C).....	65
Temperatura de Estocagem (°C).....	25

### APLICAÇÃO

**Brasnox® DM 50** é um iniciador de polimerização em resinas de poliéster insaturadas e éster vinílicas, em temperatura ambiente. Aplicações em processos hand lay-up, spray-up, laminação contínua telhas, filament winding e moldagem fechada, pode ser usado para a aplicação de gelcoats e massa plástica.



Tel: 55 11 4591-3444 e-mail: [polinox@polinox.com.br](mailto:polinox@polinox.com.br) site: [www.polinox.com.br](http://www.polinox.com.br)  
REVISÃO 02 – 15/04/2010

## ANEXO D – SOLUÇÃO DE LIMPEZA QUIMSOLV-A



Comércio Indústria Importação Ltda

### FICHA TÉCNICA

**Produto: Quimsolv-A**

Composição: Mistura c/ alto teor de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Solvente com alto teor de acetona e isento de água.  
Densidade (20 °C): 0,780 a 0,795

**Produto: Quimsolv-H**

Composição: Mistura c/ médio teor de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Solvente a base de acetona e isento de água.  
Densidade (20 °C): 0,780 a 0,795

**Produto: Quimsolv-G**

Composição: Mistura a base de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Solvente a base de acetona e isento de água com concentração de acetona inferior a 60%, este não é controlado pela Polícia Federal.  
Densidade (20 °C): 0,790 a 0,805

**Produto: Quimsolv-D**

Composição: Mistura c/ alto teor de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Contém solventes hidratados.  
Densidade (20 °C): 0,790 a 0,805

**Produto: Quimsolv-C**

Composição: Mistura c/ médio teor de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Contém solventes hidratados.  
Densidade (20 °C): 0,790 a 0,805

**Produto: Quimsolv-B**

Composição: Mistura c/ médio teor de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Contém solventes hidratados.  
Densidade (20 °C): 0,790 a 0,805

**Produto: Quimsolv-F**

Composição: Mistura a base de Acetona e solventes orgânicos oxigenados.  
Contém solventes hidratados, concentração de acetona inferior a 60%, este não é controlado pela Polícia Federal.  
Densidade (20 °C): 0,790 a 0,805





## ANEXO F – TECIDO BIAIXIAL +45/-45 400G/M<sup>2</sup>



**Tecido Biaxial +45/-45 X1200**  
Datasheet

### Descrição

X1200 é um tecido biaxial de fibra de vidro +45/-45, com 400g/m<sup>2</sup> de gramatura.

### Informações de Construção

Construção	Peso (g/m <sup>2</sup> )	Tolerância(%)	Material
0°	-	-	-
+45°	205	±2	Vidro E 2400
0°	-	-	-
-45°	205	±2	Vidro E 1500
Costura	19	±2	Poliéster 167d
Total	429	±2	-

### Informações Técnicas

	Unidade	Valores
Tipo de costura	-	Tricot
Medição da costura	-	7 costuras / 25mm
Comprimento da costura	mm	2,8
Perda ao fogo	%	0,5 - 4,0
Umidade	%	≤0,2

### Armazenamento

É recomendado que a fibra de vidro seja armazenada em local fresco e seco, com temperatura entre 10°C e 30°C e umidade entre 50% e 75%. Deve-se manter a fibra de vidro embalada até o momento do uso.

## ANEXO G – SERRA CIRCULAR MANUAL

### SERRA MÁRMORE

Modelo - 4100NH3Z



Fabricado no Brasil



#### CARACTERÍSTICAS

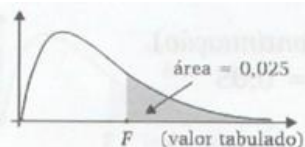
Dupla isolamento.  
13.800 rpm.

#### ESPECIFICAÇÕES

Potência : 1.300W  
Capacidade máxima de corte : 32mm  
Diâmetro do Disco : 110mm  
Diâmetro do furo : 20mm  
Espessura máx. do disco : 2mm  
Rotações por minuto : 13.800  
Peso : 2.9kg  
Emissão de vibrações: 5 m/s<sup>2</sup>  
Incerteza K: 1.5m/s<sup>2</sup>

[Comparar com outro produto](#)

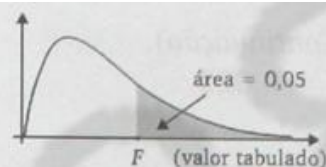
## ANEXO H – TABELA DISTRIBUIÇÃO F PARA DUAS VARIÂNCIAS

Tabela 6 (Continuação).  
 $\alpha = 0,025$ 

gl denom.	Graus de liberdade no numerador									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	647,79	799,48	864,15	899,60	921,83	937,11	948,20	956,64	963,28	968,63
2	38,51	39,00	39,17	39,25	39,30	39,33	39,36	39,37	39,39	39,40
3	17,44	16,04	15,44	15,10	14,88	14,73	14,62	14,54	14,47	14,42
4	12,22	10,65	9,98	9,60	9,36	9,20	9,07	8,98	8,90	8,84
5	10,01	8,43	7,76	7,39	7,15	6,98	6,85	6,76	6,68	6,62
6	8,81	7,26	6,60	6,23	5,99	5,82	5,70	5,60	5,52	5,46
7	8,07	6,54	5,89	5,52	5,29	5,12	4,99	4,90	4,82	4,76
8	7,57	6,06	5,42	5,05	4,82	4,65	4,53	4,43	4,36	4,30
9	7,21	5,71	5,08	4,72	4,48	4,32	4,20	4,10	4,03	3,96
10	6,94	5,46	4,83	4,47	4,24	4,07	3,95	3,85	3,78	3,72
11	6,72	5,26	4,63	4,28	4,04	3,88	3,76	3,66	3,59	3,53
12	6,55	5,10	4,47	4,12	3,89	3,73	3,61	3,51	3,44	3,37
13	6,41	4,97	4,35	4,00	3,77	3,60	3,48	3,39	3,31	3,25
14	6,30	4,86	4,24	3,89	3,66	3,50	3,38	3,29	3,21	3,15
15	6,20	4,77	4,15	3,80	3,58	3,41	3,29	3,20	3,12	3,06
16	6,12	4,69	4,08	3,73	3,50	3,34	3,22	3,12	3,05	2,99
17	6,04	4,62	4,01	3,66	3,44	3,28	3,16	3,06	2,98	2,92
18	5,98	4,56	3,95	3,61	3,38	3,22	3,10	3,01	2,93	2,87
19	5,92	4,51	3,90	3,56	3,33	3,17	3,05	2,96	2,88	2,82
20	5,87	4,46	3,86	3,51	3,29	3,13	3,01	2,91	2,84	2,77
21	5,83	4,42	3,82	3,48	3,25	3,09	2,97	2,87	2,80	2,73
22	5,79	4,38	3,78	3,44	3,22	3,05	2,93	2,84	2,76	2,70
23	5,75	4,35	3,75	3,41	3,18	3,02	2,90	2,81	2,73	2,67
24	5,72	4,32	3,72	3,38	3,15	2,99	2,87	2,78	2,70	2,64
25	5,69	4,29	3,69	3,35	3,13	2,97	2,85	2,75	2,68	2,61
26	5,66	4,27	3,67	3,33	3,10	2,94	2,82	2,73	2,65	2,59
27	5,63	4,24	3,65	3,31	3,08	2,92	2,80	2,71	2,63	2,57
28	5,61	4,22	3,63	3,29	3,06	2,90	2,78	2,69	2,61	2,55
29	5,59	4,20	3,61	3,27	3,04	2,88	2,76	2,67	2,59	2,53
30	5,57	4,18	3,59	3,25	3,03	2,87	2,75	2,65	2,57	2,51
35	5,48	4,11	3,52	3,18	2,96	2,80	2,68	2,58	2,50	2,44
40	5,42	4,05	3,46	3,13	2,90	2,74	2,62	2,53	2,45	2,39
45	5,38	4,01	3,42	3,09	2,86	2,70	2,58	2,49	2,41	2,35
50	5,34	3,97	3,39	3,05	2,83	2,67	2,55	2,46	2,38	2,32
100	5,18	3,83	3,25	2,92	2,70	2,54	2,42	2,32	2,24	2,18



Tabela 6 (Continuação).  
 $\alpha = 0,05$



gl denom.	Graus de liberdade no numerador									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,49	2,37	2,29	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08
45	4,06	3,20	2,81	2,58	2,42	2,31	2,22	2,15	2,10	2,05
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93

## ANEXO I – TABELA DO TESTE DE MANN-WHITNEY

$n_1 = 10$	$P(U \leq u_c)$ aproximadamente igual a												
	$n_2$	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999
2	0	0	0	1	2	4	16	18	19	20	20	20	20
3	0	1	2	4	5	7	23	25	26	28	29	30	30
4	1	3	4	6	8	11	29	32	34	36	37	39	39
5	2	5	7	9	12	14	36	38	41	43	45	48	48
6	4	7	9	12	15	18	42	45	48	51	53	56	56
7	6	10	12	15	18	22	48	52	55	58	60	64	64
8	7	12	14	18	21	25	55	59	62	66	68	73	73
9	9	14	17	21	25	29	61	65	69	73	76	81	81
10	11	17	20	24	28	33	67	72	76	80	83	89	89
11	13	19	23	27	32	37	73	78	83	87	91	97	97
12	15	22	25	30	35	40	80	85	90	95	98	105	105
13	18	25	28	34	38	44	86	92	96	102	105	112	112
14	20	27	31	37	42	48	92	98	103	109	113	120	120
15	22	30	34	40	45	52	98	105	110	116	120	128	128
16	24	32	37	43	49	55	105	111	117	123	128	136	136
17	26	35	39	46	52	59	111	118	124	131	135	144	144
18	28	38	42	49	56	63	117	124	131	138	142	152	152
19	30	40	45	53	59	67	123	131	137	145	150	160	160
20	33	43	48	56	63	71	129	137	144	152	157	167	167

$n_1 = 8$	$P(U \leq u_c)$ aproximadamente igual a											
$n_2$	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999
2	0	0	0	1	2	3	13	14	15	16	16	16
3	0	0	1	3	4	6	18	20	21	23	24	24
4	0	2	3	5	6	8	24	26	27	29	30	32
5	1	3	5	7	9	11	29	31	33	35	37	39
6	2	5	7	9	11	14	34	37	39	41	43	46
7	3	7	8	11	14	17	39	42	45	48	49	53
8	5	8	10	14	16	20	44	48	50	54	56	59
9	6	10	12	16	19	23	49	53	56	60	62	66
10	7	12	14	18	21	25	55	59	62	66	68	73
11	9	14	16	20	24	28	60	64	68	72	74	79
12	10	16	18	23	27	31	65	69	73	78	80	86
13	12	18	21	25	29	34	70	75	79	83	86	92
14	13	19	23	27	32	37	75	80	85	89	93	99
15	15	21	25	30	34	40	80	86	90	95	99	105
16	16	23	27	32	37	43	85	91	96	101	105	112
17	18	25	29	35	40	46	90	96	101	107	111	118
18	19	27	31	37	42	49	95	102	107	113	117	125
19	21	29	33	39	45	52	100	107	113	119	123	131
20	22	31	35	42	48	55	105	112	118	125	129	138